

TUGAS AKHIR - TM 141585

**ANALISIS PERBANDINGAN RESPON DINAMIS DARI
KENDARAAN YANG MENGGUNAKAN SISTEM
SUSPENSI HIDROLIS DENGAN KENDARAAN YANG
MENGGUNAKAN SISTEM SUSPENSI MODIFIKASI
PENAMBAHAN *SINGLE FLYWHEEL***

**BELLA KARTIKA FERANI
NRP 2112 100 159**

**Dosen Pembimbing
Dr.Eng Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng.**

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2017**



TUGAS AKHIR – TM141585

**ANALISIS PERBANDINGAN RESPON DINAMIS
DARI KENDARAAN YANG MENGGUNAKAN
SISTEM SUSPENSI HIDROLIK DENGAN
KENDARAAN YANG MENGGUNAKAN SISTEM
SUSPENSI MODIFIKASI PENAMBAHAN *SINGLE
FLYWHEEL***

BELLA KARTIKA FERANI
NRP. 2112 100 159

Dosen Pembimbing:
Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng.

PROGRAM SARJANA
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2017



FINAL PROJECT – TM141585

**DYNAMIC RESPONSE COMPARISON ANALYSIS
FROM VEHICLE USING HYDRAULIC SUSPENSION
SYSTEM BETWEEN VEHICLE USING
MODIFICATION SUSPENSION SYSTEM BY
SINGLE FLYWHEEL**

BELLA KARTIKA FERANI
NRP. 2112 100 159

Advisory Lecturer
Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng.

BACHELOR PROGRAM
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA 2017

**ANALISIS PERBANDINGAN RESPON DINAMIS
KENDARAAN YANG MENGGUNAKAN SISTEM
SUSPENSI HIDROLIK DENGAN KENDARAAN YANG
MENGGUNAKAN SISTEM SUSPENSI MODIFIKASI
PENAMBAHAN *SINGLE FLYWHEEL***

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

BELLA KARTIKA FERANI

NRP. 2112 100 159

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Eng. Harus Laksana G. ST., M.Eng (Pembimbing)
NIP. 197505111999031001
2. Ari Kurniawan Saputra, ST., MT. (Penguji I)
NIP. 198604012015041001
3. Aida Annisa Amin Daman, ST., MT. (Penguji II)
NIP. 198907052015042005



SURABAYA

JANUARI, 2017

**ANALISIS PERBANDINGAN RESPON DINAMIS DARI
KENDARAAN YANG MENGGUNAKAN SISTEM
SUSPENSI HIDROLIK DENGAN KENDARAAN YANG
MENGGUNAKAN SISTEM SUSPENSI MODIFIKASI
PENAMBAHAN
SINGLE FLYWHEEL**

Nama Mahasiswa : Bella Kartika Ferani
NRP : 2112100159
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Eng. Harus Laksana Guntur,
ST., M. Eng.

ABSTRAK

Indonesia dilaporkan mengalami kenaikan jumlah kecelakaan lalu lintas hingga lebih dari 80 persen. Mobil penumpang, yang tergolong dalam Multi Purpose Vehicle (MPV) menempati posisi kedua dalam keterlibatan kendaraan dalam kecelakaan. Salah satu penyebab kecelakaan yang hampir sering terjadi yaitu kondisi permukaan jalan yang tidak rata, sehingga pada saat mobil melaju kencang melewati jalan yang bergelombang akan melayang. Hal tersebut dapat mengakibatkan kerusakan sistem suspensi pada kendaraan MPV yang berdampak pada berkurangnya tingkat kenyamanan dan keamanan pengemudi dan penumpang kendaraan saat menerima getaran berlebih. Salah satu cara untuk meningkatkan performa sistem suspensi dari MPV yaitu memodifikasi sistem suspensi hidrolik dengan sistem suspensi mekanis melalui pemanfaatan konsep flywheel. Flywheel tersebut digunakan untuk menyimpan energi rotasi yang dapat dimanfaatkan sebagai energi redaman.

Dalam tugas akhir ini dilakukan pemodelan dan simulasi dari perubahan parameter yang ada pada sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan single flywheel terhadap gaya redam, serta respon dinamis dari kendaraan dan

penumpang. Densitas dari material flywheel yang divariasikan yaitu cast iron (6800 kg/m^3), stainless steel (7480 kg/m^3), dan brass-casting (8400 kg/m^3). Sedangkan untuk frekuensi input sistem suspensi divariasikan dari 0.5 Hz hingga 2 Hz dengan kenaikan setiap 0.5 Hz. Input yang digunakan pada simulasi ini yaitu input sinusoidal dan bump modified.

Dari penelitian ini, didapatkan hasil bahwa nilai gaya redam yang dihasilkan pada sistem suspensi single flywheel lebih tinggi dibandingkan dengan sistem suspensi hidrolik pada beberapa variasi frekuensi. Pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan penggunaan sistem suspensi hidrolik, karakteristik respon kendaraan dan penumpang mencapai kondisi steady state kurang dari 3 detik dan 4 detik. Sedangkan pada sistem suspensi modifikasi penambahan single flywheel, respon kendaraan dan penumpang mencapai kondisi steady state kurang dari 2 detik. Pada kedua sistem suspensi tersebut menunjukkan peningkatan nilai perpindahan RMS mulai kecepatan 20 km/jam hingga 40 km/jam, kemudian mengalami penurunan hingga kecepatan 80 km/jam. Apabila dibandingkan dengan standar ISO 2631, pada penggunaan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan single flywheel, mulai kecepatan 60 km/jam dapat dikatakan tidak nyaman, sehingga kedua sistem suspensi tersebut kurang cocok digunakan pada kecepatan tinggi.

Kata kunci: sistem suspensi hidrolik, sistem suspensi modifikasi single flywheel, respon dinamis, sistem seperempat kendaraan, parameter

DYNAMIC RESPONSE COMPARISON ANALYSIS FROM VEHICLE USING HYDRAULIC SUSPENSION SYSTEM BETWEEN VEHICLE USING MODIFICATION SUSPENSION SYSTEM BY SINGLE FLYWHEEL

Name : Bella Kartika Ferani
NRP : 2112100159
Department : Mechanical Engineering FTI-ITS
Advisory Lecturer : Dr. Eng. Harus Laksana Guntur,
ST., M. Eng.

ABSTRACT

Indonesia reported an increase in the number of traffic accidents by more than 80 percent. Passenger car, that include to the Multi Purpose Vehicle (MPV) got the second place in the vehicle involved in the accidents. One of the causes of accidents that nearly often happens is the condition of the road surfaces is uneven, so that when the car speed past the bumpy road will drift. This can result in damage to the vehicle suspension system which led to a reduction MPV levels of comfort and safety of drivers and passengers of vehicles when receiving excessive vibration. One way to improve the performance of the suspension system of MPV that modify the hydraulic suspension system with mechanical suspension system through the utilization of the flywheel concept. The flywheel is used to store rotational energy that can be harnessed as an energy damping.

In this thesis, the modeling and simulation of changes in the parameters that exist in the hydraulic suspension system and modification suspension system by single flywheel to the damping force, and dynamic response of the vehicle and passengers. The density of the material varied flywheel is cast iron (6800 kg/m^3), stainless steel (7480 kg/m^3), and brass casting (8400 kg/m^3). As for the input frequency suspension system varied from 0.5 Hz to 2 Hz

with a rise of 0.5 Hz eaches. Inputs used in this simulation are a sinusoidal input and bump modified.

From this research, showed that the damping force generated in the single flywheel suspension system is higher than the hydraulic suspension system at some variation of frequency. On the quarter car vehicle system with the use of hydraulic suspension system, the response characteristics of vehicles and passengers reach steady state conditions in less than 3 seconds and 4 seconds. While the modification suspension system by single flywheel, response vehicles and passengers reach steady state conditions in less than 2 seconds. In both suspension system shows the increase in the value of RMS displacement starts speed of 20 km/hr to 40 km/hr, and then decreased to a speed of 80 km/hr. When compared to the standard ISO 2631, the use of hydraulic suspension system and modification suspension system by single flywheel from a speed 60 km/hr can be said to be uncomfortable, so that the suspension system is less suitable for use in high speed.

Keywords: hydraulic suspension system, modification suspension system by single flywheel, dynamic response, quarter car vehicle system, parameter

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah memberikan segala rahmat dan hidayah-Nya hingga penulis dengan segala keterbatasannya dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul **ANALISIS PERBANDINGAN RESPON DINAMIS KENDARAAN YANG MENGGUNAKAN SISTEM SUSPENSI HIDROLIK DENGAN KENDARAAN YANG MENGGUNAKAN SISTEM SUSPENSI MODIFIKASI PENAMBAHAN *SINGLE FLYWHEEL*** ini dengan baik dan tepat pada waktunya. Dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, penulis ingin menyampaikan banyak terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu secara moral maupun materi, yakni:

1. **Bapak Karto dan Ibu Suli Suliam** selaku orang tua penulis, serta **Dwiky Hafidz Darmawan**, adik penulis yang selalu memberikan doa dan dukungan yang tak terhingga;
2. **Bapak Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng.** sebagai dosen pembimbing tugas akhir penulis yang telah banyak memberikan bimbingan dan ilmu mengenai mekanika getaran yang terkait dengan tugas akhir ini;
3. **Ibu Aida Annisa Amin Daman, ST., MT.** dan **Bapak Ari Kurniawan Saputra, ST., MT.** selaku dosen penguji tugas akhir penulis dan **Bapak Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D.**, serta **Bapak Alief Wikarta, ST., M.Sc., Ph.D.** selaku dosen penguji seminar proposal tugas akhir penulis yang telah banyak memberikan arahan dan saran kepada penulis;
4. **Bapak Ir. Nur Ikhwan, M.Eng.Sc.** selaku dosen wali penulis yang telah berjasa memberikan motivasi penulis saat menempuh perkuliahan di Teknik Mesin FTI-ITS;
5. **Seluruh Dosen dan Karyawan** yang telah banyak membimbing penulis dalam menggali ilmu di Teknik Mesin FTI-ITS;

6. Tim “Sikat Cuy” alias *Steering Committee* **POROS Mesin 2016** (**Rian, Azis, Rayhan, Ade, Ita, Bintang, Dani, Billy, Koles, Adit, Yola, Dea, Ilham, Tito, dan Wira**) yang telah memberikan pengalaman baru di akhir tahun perkuliahan penulis;
7. Geng **Badan Semi Otonom HMM 2014-2015** (**Tasa, Iwed, Radit, Rian, dan Romario**) yang selalu memberikan momen-momen berharga selama berorganisasi di masa perkuliahan penulis;
8. Seluruh Tim **#HARUS115** (**Fadli, Wando, Fauzi, Betari, Ayu, Rai, Piendra, Didin, IBP, dan Tiara**), serta *single fighter* **#WIWIEK115** (**Mandut**) yang telah banyak membantu, saling *support*, dan menghadirkan tawa canda dalam proses pengerjaan tugas akhir penulis;
9. Kepada **Rizkiardi Wilis Prakoso** yaitu seseorang yang berharga di kehidupan penulis, selalu sabar setia menemani, menjaga, dan memberikan dukungan dalam hal apapun;
10. Seluruh **Warga Lab Vibrasi dan Sistem Dinamis**, khususnya **Dian, Dewani Intan, Dwi, dan Vincent** yang telah setia memberikan senyum semangat kepada penulis;
11. **Raden Ayu Mlete (Selvi, Betari, Ayu, dan Lintang)** yang telah menjadi teman terdekat penulis sejak Mahasiswa Baru hingga penulis menyelesaikan masa perkuliahannya;
12. **Tim Gosip Mesin (Afifah, Ica, dan Tasa)** yang selalu menghibur dan mempererat internal dengan gosip-gosip hangatnya;
13. **Dewi a.k.a Dewor**, kakak penulis di Teknik Mesin FTI-ITS, yang telah banyak memberikan saran baik dalam akademik maupun non akademik;
14. **Seluruh keluarga besar M55 (Mesin ITS 2012)** yang telah menjadi keluarga kedua penulis, membantu, menghibur, dan memberi dukungan;

15. **Mahasiswa Baru Teknik Mesin FTI-ITS 2016 Kelompok 3 (Benny, Rifqy, Aqbil, Echa, Farras, Aji, Marcel, Alfa, Raihan, Septian, Titan, dan Wildhan)** yang telah hadir memberikan pengalaman indah di akhir perkuliahan penulis;
16. Seluruh pihak yang belum disebutkan di atas yang telah memberikan doa, bantuan, dan dukungannya bagi penulis hingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik dan tepat pada waktunya

Penulis mengharapkan kritik dan saran demi kesempurnaan tugas akhir ini. Akhirnya, penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan di masa depan.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xix
BAB I (PENDAHULUAN)	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat	3
BAB II (TINJAUAN PUSTAKA)	5
2.1 Sistem Suspensi	5
2.2 Konsep <i>Flywheel</i> sebagai Peredam	14
2.3 Pemodelan Dinamis $\frac{1}{4}$ Kendaraan	19
2.4 Transmisibilitas Perpindahan (<i>Displacement Transmissibility</i>)	21
2.5 Transmisibilitas Gaya (<i>Force Transmissibility</i>)	22
2.6 Pengaruh Percepatan Kendaraan terhadap Kenyamanan Pengendara	23
BAB III (METODOLOGI)	25
3.1 Metode Penelitian	25
3.2 Tahap Studi Literatur	28
3.3 Pemodelan dan Simulasi Sistem Suspensi Hidrolik dan Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan <i>Single Flywheel</i>	29

3.3.1 Pemodelan Fisik Sistem Suspensi Hidrolik dan Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan <i>Single Flywheel</i>	29
3.3.2 Pemodelan Dinamis Sistem Suspensi Hidrolik dan Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan <i>Single Flywheel</i>	31
3.3.3 Pembuatan Blok Simulasi Sistem Suspensi Hidrolik dan Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan <i>Single Flywheel</i>	32
3.3.4 Analisis Grafik Sistem Suspensi Hidrolik dan Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan <i>Single Flywheel</i> ...	36
3.4 Pemodelan dan Simulasi Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dengan Penggunaan Sistem Suspensi Hidrolik dan Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan <i>Single Flywheel</i>	36
3.4.1 Pemodelan Dinamis dan Pembuatan Persamaan dari Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dengan Penggunaan Sistem Suspensi Hidrolik dan Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan <i>Single Flywheel</i> ..	36
3.4.2 Pembuatan Blok Simulasi Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dengan Penggunaan Sistem Suspensi Hidrolik dan Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan <i>Single Flywheel</i>	38
3.4.3 Analisis Grafik Sistem Seperempat Kendaraan dengan Penggunaan Sistem Suspensi Hidrolik dan Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan <i>Single Flywheel</i>	40
BAB IV (PEMODELAN SISTEM)	43
4.1 Pemodelan Dinamis dan Gaya Redam pada Sistem Suspensi	43
4.1.1 Pemodelan Dinamis dan Gaya Redam pada Sistem Suspensi Hidrolik	43
4.1.2 Pemodelan Dinamis dan Gaya Redam pada Sistem	

Suspensi Modifikasi Penambahan <i>Single Flywheel</i>	45
4.2 Pemodelan Dinamis Sistem Seperempat Kendaraan Mobil	46
4.2.1 Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dengan Sistem Suspensi Hidrolik	47
4.2.2 Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dengan Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan <i>Single Flywheel</i>	50
4.3 Diagram Blok	55
4.3.1 <i>Input</i> yang Digunakan	55
4.3.2 Diagram Blok Sistem Suspensi	58
4.3.3 Diagram Blok Sistem Seperempat Kendaraan Mobil Dengan Penggunaan Sistem Suspensi Hidrolik dan Sistem Suspensi Modifikasi <i>Single Flywheel</i>	59
BAB V (ANALISIS DAN PEMBAHASAN)	65
5.1 Respon Dinamis Sistem Suspensi Hidrolik	66
5.2 Respon Dinamis Sistem Suspensi <i>Single Flywheel</i>	68
5.3 Perbandingan Respon Dinamis Kendaraan dari Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dengan Sistem Suspensi Hidrolik dan Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan <i>Single Flywheel</i>	72
5.3.1 <i>Input</i> Sinusoidal	73
5.3.2 <i>Input Bump Modified</i>	81
5.4 Perbandingan Respon Dinamis Penumpang pada Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dengan Sistem Suspensi Hidrolik dan Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan <i>Single Flywheel</i>	87
5.4.1 <i>Input</i> Sinusoidal	87
5.4.2 <i>Input Bump Modified</i>	95
5.5 Perbandingan RMS (<i>Root Mean Square</i>) Percepatan Penumpang pada Sistem Suspensi Hidrolik dan Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan <i>Single Flywheel</i> dengan Variasi Kecepatan Kendaraan	101

5.6 Perbandingan <i>Displacement Transmissibility Input</i> Sinusoidal pada Sistem Seperempat Kendaraan Menggunakan Sistem Suspensi Hidrolik dan Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan <i>Single</i> <i>Flywheel</i>	105
BAB VI (KESIMPULAN DAN SARAN)	109
6.1 Kesimpulan	109
6.2 Saran	110
DAFTAR PUSTAKA	113

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Sistem suspensi pada truk	5
Gambar 2.2. Sistem suspensi dependen (<i>rigid</i>)	6
Gambar 2.3. Sistem suspensi independen (bebas)	6
Gambar 2.4. Komponen sistem suspensi	8
Gambar 2.5. <i>Shock Absorber</i>	8
Gambar 2.6. Siklus kompresi pada <i>shock absorber</i>	9
Gambar 2.7. Siklus ekspansi pada <i>shock absorber</i>	10
Gambar 2.8. Grafik perbandingan gaya redam terhadap (a) kecepatan dan (b) percepatan pada sistem hidrolik dengan posisi suspensi tegak	11
Gambar 2.9. Grafik perbandingan gaya redam terhadap (a) kecepatan dan (b) percepatan pada sistem hidrolik dengan posisi suspensi miring	11
Gambar 2.10. Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang pesawat terbang terhadap waktu dengan <i>input bump modified</i> ($\gamma = 5$)	13
Gambar 2.11. Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang pesawat terbang terhadap waktu dengan <i>input sinusoidal</i>	14
Gambar 2.12. Skema mekanis dari <i>inertor</i>	15
Gambar 2.13. Suatu massa yang belum ditambahkan sistem suspensi	16
Gambar 2.14. Massa yang ditambahkan sistem suspensi <i>inertor</i> (a) dan sistem suspensi konvensional (b)	17
Gambar 2.15. Grafik respon frekuensi (a) dan respon perpindahan (b) pada sistem suspensi <i>inertor</i> (-) dan sistem suspensi konvensional (-)	18
Gambar 2.16. <i>Rack and pinion inertor</i> yang dibuat di <i>Cambridge University</i>	19
Gambar 2.17. Model seperempat kendaraan dari bus	20

Gambar 2.18. Grafik Variasi T_d dan ϕ terhadap r	21
Gambar 2.19. <i>Force Transmissibility</i>	22
Gambar 2.20. Ketahanan badan manusia terhadap percepatan linier yang dapat diterima	24
Gambar 3.1. Diagram alir penyelesaian tugas akhir	27
Gambar 3.2. Model fisik sistem suspensi hidrolik	29
Gambar 3.3. Model fisik sistem suspensi modifikasi penambahan <i>single flywheel</i> (a) tampak isometrik, (b) tampak samping, dan (c) tampak depan	30
Gambar 3.4. Susunan sistem suspensi modifikasi	30
Gambar 3.5. Model dinamis sistem suspensi hidrolik (a) siklus kompresi dan (b) siklus ekspansi	31
Gambar 3.6. Model dinamis sistem suspensi modifikasi penambahan <i>single flywheel</i>	32
Gambar 3.7. Diagram alir pembuatan blok diagram Simulink dari sistem suspensi hidrolik	34
Gambar 3.8. Diagram alir pembuatan blok diagram Simulink dari sistem suspensi <i>single flywheel</i>	35
Gambar 3.9. Model dinamis dari sistem seperempat kendaraan mobil	37
Gambar 3.10. Diagram alir pembuatan persamaan gerak dari sistem seperempat kendaraan mobil dengan penggunaan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan <i>single flywheel</i>	38
Gambar 3.11. Diagram alir proses pembuatan blok Simulink dari sistem seperempat kendaraan dengan penggunaan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan <i>single flywheel</i>	40
Gambar 4.1. <i>Free Body Diagram</i> kendaraan model <i>half</i> <i>car</i>	46
Gambar 4.2. <i>Free Body Diagram</i> sistem seperempat kendaraan mobil dengan suspensi hidrolik	48

Gambar 4.3. <i>Free Body Diagram</i> sistem seperempat kendaraan mobil dengan suspensi modifikasi penambahan <i>single flywheel</i>	51
Gambar 4.4. Profil jalan dengan <i>input bump modified</i> (a) $\gamma = 1$, (b) $\gamma = 5$, (c) $\gamma = 20$	56
Gambar 4.5. Profil jalan dengan <i>input</i> sinusoidal pada kecepatan (a) 20 km/jam, (b) 40 km/jam, (c) 60 km/jam	57
Gambar 4.6. Diagram blok gaya redam pada sistem suspensi hidrolik	58
Gambar 4.7. Diagram blok gaya redam pada sistem suspensi modifikasi <i>single flywheel</i>	59
Gambar 4.8. Diagram blok untuk sistem seperempat kendaraan mobil dengan sistem suspensi hidrolik menggunakan <i>input</i> sinusoidal	60
Gambar 4.9. Diagram blok untuk sistem seperempat kendaraan mobil dengan sistem suspensi modifikasi penambahan <i>single flywheel</i> menggunakan <i>input</i> sinusoidal	61
Gambar 4.10. Diagram blok untuk sistem seperempat kendaraan mobil dengan sistem suspensi hidrolik menggunakan <i>input bump modified</i>	62
Gambar 4.11. Diagram blok untuk sistem seperempat kendaraan mobil dengan sistem suspensi modifikasi penambahan <i>single flywheel</i> menggunakan <i>input bump modified</i>	63
Gambar 5.1. Grafik respon perpindahan (a) dan kecepatan (b) terhadap gaya redam pada sistem suspensi hidrolik dengan variasi frekuensi	67
Gambar 5.2. Grafik respon perpindahan dan kecepatan terhadap gaya redam pada sistem suspensi <i>single flywheel</i> dengan variasi densitas material <i>pinion</i> dan <i>flywheel</i> , serta frekuensi	70
Gambar 5.3. Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan,	

	(c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan <i>input</i> sinusoidal ($v = 20$ km/jam)	73
Gambar 5.4.	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan <i>input</i> sinusoidal ($v = 40$ km/jam)	75
Gambar 5.5.	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan <i>input</i> sinusoidal ($v = 60$ km/jam)	77
Gambar 5.6.	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan <i>input</i> sinusoidal ($v = 80$ km/jam)	79
Gambar 5.7.	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan <i>input bump modified</i> ($\gamma = 1$)	81
Gambar 5.8.	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan <i>input bump modified</i> ($\gamma = 5$)	83
Gambar 5.9.	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan <i>input bump modified</i> ($\gamma = 20$)	85
Gambar 5.10.	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan <i>input</i> sinusoidal ($v = 20$ km/jam)	88
Gambar 5.11.	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan <i>input</i> sinusoidal ($v = 40$ km/jam)	90

Gambar 5.12.	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan <i>input</i> sinusoidal ($v = 60$ km/jam)	92
Gambar 5.13.	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan <i>input</i> sinusoidal ($v = 80$ km/jam)	94
Gambar 5.14.	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan <i>input bump modified</i> ($\gamma = 1$)	96
Gambar 5.15.	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan <i>input bump modified</i> ($\gamma = 5$)	98
Gambar 5.16.	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan <i>input bump modified</i> ($\gamma = 20$)	100
Gambar 5.17.	Grafik respon percepatan RMS penumpang sistem seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi <i>single flywheel</i> terhadap frekuensi menggunakan <i>input</i> sinusoidal	102
Gambar 5.18.	Grafik ketahanan pengemudi berdasarkan ISO 2631	103
Gambar 5.19.	Grafik perbandingan <i>displacement transmissibility</i> antara penggunaan sistem suspensi hidrolik dengan sistem suspensi modifikasi	106

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Nilai gaya redam yang dihasilkan pada sistem hidrolik dengan dan tanpa sudut	12
Tabel 2.2. Reaksi kenyamanan terhadap percepatan – ISO 2631	24
Tabel 3.1. Parameter sistem suspensi hidrolik	33
Tabel 3.2. Parameter sistem suspensi modifikasi penambahan <i>Single flywheel</i>	33
Tabel 3.3. Parameter untuk simulasi seperempat kendaraan Avanza 1.3S	39
Tabel 5.1. Parameter dan variasi yang digunakan pada Simulasi sistem suspensi hidrolik	66
Tabel 5.2. Nilai gaya redam siklus ekspansi dan kompresi pada sistem suspensi hidrolik	68
Tabel 5.3. Parameter dan variasi yang digunakan pada simulasi Sistem <i>single flywheel</i>	69
Tabel 5.4. Nilai gaya redam siklus ekspansi dan kompresi pada sistem suspensi <i>single flywheel</i>	71
Tabel 5.5. Nilai respon dinamis hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan <i>single flywheel</i> ($v = 20$ km/jam) menggunakan <i>input</i> sinusoidal	74
Tabel 5.6. Nilai respon dinamis hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan <i>single flywheel</i> ($v = 40$ km/jam) menggunakan <i>input</i> sinusoidal	76
Tabel 5.7. Nilai respon dinamis hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan <i>single flywheel</i> ($v = 60$ km/jam) menggunakan <i>input</i> sinusoidal	78
Tabel 5.8. Nilai respon dinamis hasil simulasi seperempat	

kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan <i>single flywheel</i> ($v = 80$ km/jam) menggunakan <i>input</i> sinusoidal	80
Tabel 5.9. Nilai respon dinamis hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan <i>single flywheel</i> ($\gamma = 1$) menggunakan <i>input bump modified</i>	82
Tabel 5.10. Nilai respon dinamis hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan <i>single flywheel</i> ($\gamma = 5$) menggunakan <i>input bump modified</i>	84
Tabel 5.11. Nilai respon dinamis hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan <i>single flywheel</i> ($\gamma = 20$) menggunakan <i>input bump modified</i>	86
Tabel 5.12. Nilai respon dinamis penuumpang hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan <i>single flywheel</i> ($v = 20$ km/jam)	89
Tabel 5.13. Nilai respon dinamis penuumpang hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan <i>single flywheel</i> ($v = 40$ km/jam)	91
Tabel 5.14. Nilai respon dinamis penuumpang hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan <i>single flywheel</i> ($v = 60$ km/jam)	93
Tabel 5.15. Nilai respon dinamis penuumpang hasil	

simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan <i>single flywheel</i> ($v = 80$ km/jam)	95
Tabel 5.16. Nilai respon dinamis penuumpang hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan <i>single flywheel</i> ($\gamma = 1$) menggunakan <i>input bump modified</i>	97
Tabel 5.17. Nilai respon dinamis penuumpang hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan <i>single flywheel</i> ($\gamma = 5$) menggunakan <i>input bump modified</i>	99
Tabel 5.18. Nilai respon dinamis penuumpang hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan <i>single flywheel</i> ($\gamma = 20$) menggunakan <i>input bump modified</i>	101
Tabel 5.19. Nilai percepatan RMS dari sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan <i>single flywheel</i>	102
Tabel 5.20. Perbandingan nilai ketahanan pengemudi saat berkendara dengan kendaraan yang menggunakan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan <i>single flywheel</i>	104
Tabel 5.21. Nilai perpindahan RMS dari sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan <i>single flywheel</i>	105

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia merupakan negara yang menempati urutan pertama peningkatan kecelakaan menurut data *Global Status Report on Road Safety* yang dikeluarkan *World Health Organization* (WHO). Indonesia dilaporkan mengalami kenaikan jumlah kecelakaan lalu lintas hingga lebih dari 80 persen. Mobil penumpang, salah satunya yang tergolong dalam *Multi Purpose Vehicle* (MPV) menempati posisi kedua dalam keterlibatan kendaraan dalam kecelakaan. Salah satu penyebab kecelakaan yang hampir sering terjadi yaitu kondisi permukaan jalan yang tidak rata, sehingga pada saat mobil melaju kencang melewati jalan yang bergelombang akan melayang. Hal tersebut dapat mengakibatkan kerusakan sistem suspensi pada kendaraan MPV yang berdampak pada berkurangnya tingkat kenyamanan dan keamanan pengemudi dan penumpang kendaraan saat menerima getaran berlebih.

ISO 2631/1974 telah menetapkan batas-batas getaran yang boleh dialami pengemudi selama berkendara^[1]. Untuk memenuhi kriteria yang ditetapkan oleh standar tersebut, maka sistem suspensi MPV harus dirancang dengan desain yang baik agar mampu menghadapi kondisi perubahan jalan, kecepatan, dan massa muatan. Sistem suspensi tersebut harus memiliki properti nilai kekakuan dan redaman yang sesuai. Sistem suspensi yang digunakan pada kendaraan MPV merupakan sistem suspensi pasif (konvensional), yang memiliki nilai kekakuan pegas dan konstanta redaman konstan. *Shock absorber* yang digunakan yaitu *hydraulic shock absorber* dengan minyak sebagai fluida kerja pada silinder hidrolik.

Salah satu cara untuk meningkatkan performa sistem suspensi dari MPV yaitu memodifikasi sistem suspensi hidrolik dengan sistem suspensi mekanis melalui pemanfaatan konsep *flywheel*. *Flywheel* tersebut digunakan untuk menyimpan energi

rotasi yang dapat dimanfaatkan sebagai energi redaman. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan pemodelan dan analisis sistem suspensi modifikasi dengan penambahan *single flywheel*. Selain itu, didapatkan juga respon dinamis dari penumpang dan kendaraan MPV menggunakan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* dengan mempertimbangkan kenyamanan.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perbandingan gaya redam dari sistem suspensi hidrolik dengan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*?
2. Bagaimana perbandingan karakteristik respon dinamis dari kendaraan yang menggunakan sistem suspensi hidrolik dengan kendaraan yang menggunakan sistem suspensi modifikasi *single flywheel*?
3. Bagaimana perbandingan respon dinamis penumpang kendaraan yang menggunakan sistem suspensi hidrolik dengan penumpang kendaraan yang menggunakan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* ditinjau dari standar kenyamanan?

1.3. Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Membandingkan gaya redam dari sistem suspensi hidrolik dengan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*;
2. Membandingkan karakteristik respon dinamis dari kendaraan yang menggunakan sistem suspensi hidrolik dengan kendaraan yang menggunakan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*;

3. Membandingkan respon dinamis dari penumpang kendaraan yang menggunakan sistem suspensi hidrolik dengan penumpang kendaraan yang menggunakan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* ditinjau dari standar kenyamanan.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Simulasi hanya menggunakan sistem seperempat kendaraan (*quarter car*);
2. Kendaraan MPV yang dimodelkan yaitu Avanza 1.3S;
3. Fluida kerja pada sistem *fluid suspension* silinder hidrolik diasumsikan *incompressible flow*;
4. *Head loss* pada sistem suspensi hidrolik diabaikan;
5. Massa *rack* pada sistem suspensi *single flywheel* diabaikan;
6. Kriteria kenyamanan ditentukan dengan standar ISO 2631;
7. *Input* yang digunakan dalam simulasi adalah *input* sinusoidal dan *bump modified*;
8. Parameter-parameter yang digunakan ditentukan dari jurnal.

1.5. Manfaat

Manfaat dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan informasi mengenai perbandingan gaya redam dari sistem suspensi hidrolik dengan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*;
2. Memberikan informasi mengenai perbandingan karakteristik respon dinamis dari kendaraan yang menggunakan sistem suspensi hidrolik dengan kendaraan yang menggunakan sistem suspensi modifikasi *single flywheel*;

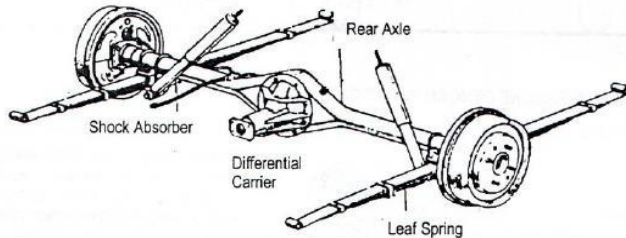
3. Memberikan informasi mengenai perbandingan respon dinamis dari penumpang kendaraan yang menggunakan sistem suspensi hidrolik dengan penumpang kendaraan yang menggunakan sistem suspensi modifikasi *single flywheel* ditinjau dari standar kenyamanan;
4. Sebagai referensi untuk penelitian sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem Suspensi

Sistem suspensi adalah kumpulan komponen tertentu yang berfungsi meredam kejutan, getaran yang terjadi pada kendaraan akibat permukaan jalan yang tidak rata yang dapat meningkatkan kenyamanan berkendara dan pengendalian kendaraan. Sistem suspensi terdiri dari beberapa bagian yaitu pegas, peredam kejut, dan lengan. Sistem suspensi kendaraan terletak di antara bodi (kerangka) dengan roda.

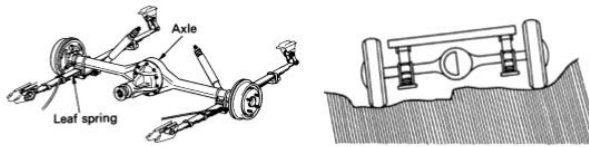


Gambar 2.1. Sistem suspensi pada truk^[3]

Ada dua jenis suspensi yang utama^[3], di antaranya:

- a. Sistem suspensi dependen atau sistem suspensi poros kaku (*rigid*)

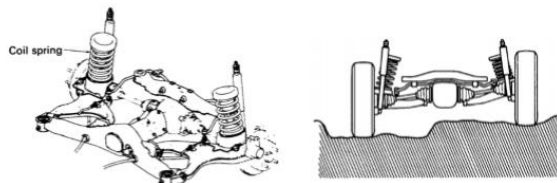
Pada sistem suspensi *rigid*, roda kiri dan kanan dihubungkan oleh satu poros (*axle*) dan banyak digunakan pada suspensi depan dan belakang kendaraan niaga (seperti truk), juga suspensi belakang mobil penumpang. Sistem suspensi *rigid* ini memiliki konstruksi yang kuat dan sederhana.



Gambar 2.2. Sistem suspensi dependen (*rigid*)

- b. Sistem suspensi independen atau sistem suspensi bebas

Pada sistem suspensi independen, roda kiri dan kanan tidak dihubungkan oleh satu poros (*axle*). Kedua roda dapat bergerak secara bebas tanpa saling mempengaruhi. Digunakan pada suspensi depan mobil penumpang dan truk kecil, juga suspensi belakang mobil penumpang.



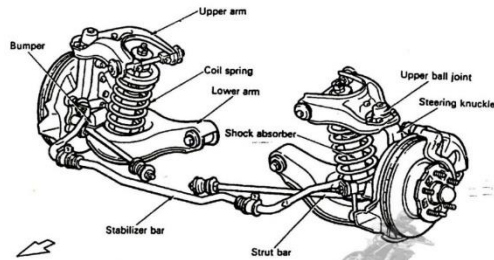
Gambar 2.3. Sistem suspensi independen (bebas)

Komponen-komponen yang terdapat dalam sistem suspensi adalah^[2]:

- a. Pegas

Pegas terbuat dari baja yang berfungsi untuk menyerap kejutan dari permukaan jalan dan getaran roda agar tidak diteruskan ke bodi secara langsung. Ada beberapa tipe pegas pada kendaraan, di antaranya pegas *coil* (*coil spring*), pegas daun (*leaf spring*), dan pegas batang torsi (*torsion bar spring*).

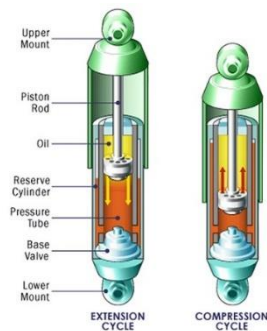
- b. *Shock Absorber*
Shock absorber berfungsi untuk meredam osilasi (gerakan naik-turun) pegas saat menerima kejutan dari permukaan jalan.
- c. *Ball Joint*
Ball joint berfungsi untuk menerima beban vertikal dan lateral, juga sebagai sumbu putaran roda saat kendaraan belok.
- d. *Stabilizer Bar*
Stabilizer bar berfungsi untuk mengurangi kemiringan kendaraan akibat gaya sentrifugal saat kendaraan membelok. Untuk suspensi depan, *stabilizer bar* biasanya dipasang pada kedua *lower arm* melalui bantalan karet dan *linkage*. Pada bagian tengah diikat dengan rangka atau bodi pada dua tempat melalui *bushing*.
- e. *Strut Bar*
Strut bar berfungsi untuk menahan *lower arm* agar tidak bergerak maju-mundur saat menerima kejutan dari jalan atau dorongan akibat terjadinya pengereman.
- f. *Bumper*
Bumper berfungsi sebagai pelindung komponen-komponen suspensi saat pegas mengkerut atau mengembang di luar batas maksimum.
- g. *Lateral Control Rod*
Komponen ini dipasang di antara poros penyangga (*axel*) dan bodi mobil, fungsinya untuk menahan *axel* selalu pada posisinya bila menerima beban samping.



Gambar 2.4. Komponen sistem suspensi

2.1.1. Sistem Peredam Hidrolik

Jika sistem suspensi hanya dilengkapi dengan sebuah pegas saja, maka setiap kendaraan yang menghantam *bump* akan mengalami pantulan yang naik turun selama beberapa kali pada frekuensi natural pegasnya. Ketika tertekan oleh sebuah *bump*, sebuah sistem suspensi membutuhkan komponen untuk mendisipasi energi yang tersimpan pada pegas. *Shock absorber* atau peredam kejutan adalah alat yang digunakan untuk mendisipasi energi tersebut seperti terlihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5. *Shock absorber*
(Sumber: bikedeals.wordpress.com)

Sistem suspensi hidrolik (*hydraulic suspension*) adalah jenis sistem suspensi yang biasa digunakan pada mobil. Pada sistem suspensi hidrolik ini menggunakan minyak sebagai fluida

kerja pada silinder hidrolik. Sistem suspensi bekerja dalam dua siklus yaitu siklus kompresi dan siklus ekspansi.

a. Siklus Kompresi

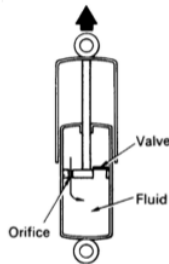
Saat *shock absorber* ditekan karena gaya osilasi dari pegas suspensi, maka gerakan *shock absorber* memendek. Siklus kompresi terjadi ketika piston bergerak ke bawah, menekan fluida hidrolik di dalam ruang bawah piston. Minyak *shock absorber* yang berada di bawah piston akan naik ke ruang atas piston melalui lubang yang ada pada piston. Sementara lubang kecil (*orifice*) pada piston tertutup karena katup menutup saluran *orifice* tersebut. Penutupan katup ini disebabkan karena peletakan katup yang berupa membran (plat tipis) dipasangkan di bawah piston, sehingga ketika minyak *shock absorber* berusaha naik ke atas maka katup membran ini akan terdorong oleh *shock absorber* dan akibatnya menutup saluran *orifice*. Jadi minyak *shock absorber* akan menuju ke atas melalui lubang yang besar pada piston, sementara minyak tidak bisa keluar melalui saluran *orifice* pada piston. Pada saat ini *shock absorber* tidak melakukan peredaman terhadap gaya osilasi dari pegas suspensi karena minyak dapat naik ke ruang di atas piston dengan sangat mudah. Siklus kompresi tersebut dapat digambarkan sesuai pada gambar 2.6.



Gambar 2.6. Siklus kompresi pada *shock absorber*
(Sumber: connectingwillys.blogspot.com)

b. Siklus Ekspansi

Pada saat ekspansi, piston di dalam tabung akan bergerak dari bawah naik ke atas. Gerakan naik piston ini membuat minyak *shock absorber* yang sudah berada di atas menjadi tertekan. Minyak *shock absorber* ini akan mencari jalan keluar agar tidak tertekan oleh piston, maka minyak ini akan mendorong katup pada saluran *orifice* untuk membuka dan minyak akan keluar atau turun ke bawah melalui saluran *orifice*. Pada saat ini katup pada lubang besar di piston akan tertutup karena katup ini terletak di atas piston. Minyak *shock absorber* ini akan menekan katup lubang besar, piston ke bawah dan mengakibatkan katup tertutup. Pada saat itu, minyak *shock absorber* hanya dapat turun melalui saluran *orifice* kecil, karena saluran kecil maka minyak *shock absorber* tidak akan bisa cepat turun ke bawah atau terhambat. Di saat itulah *shock absorber* melakukan peredaman terhadap gaya osilasi pegas suspensi. Siklus ekspansi tersebut dapat digambarkan sesuai pada gambar 2.7.

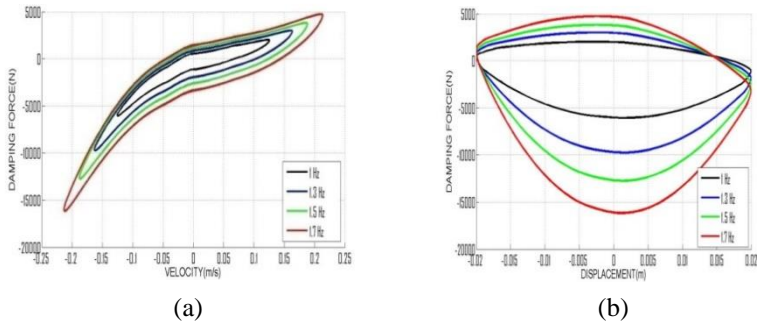


Gambar 2.7. Siklus ekspansi pada *shock absorber*
(Sumber: conectingwillys.blogspot.com)

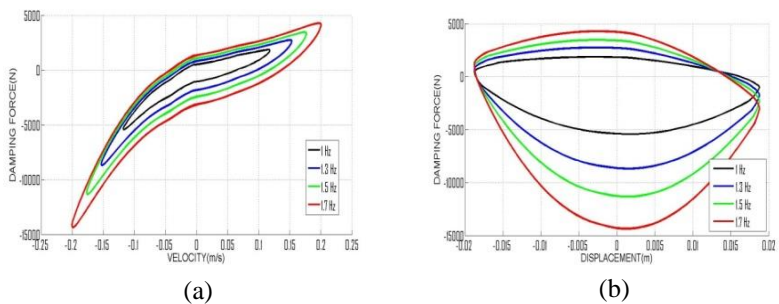
Pada tahun 2015, Tri Ayu Rachmawati mahasiswa Lintas Jalur Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya melakukan pemodelan respon dinamis sistem HMERSA (*Hydro-Magneto Electro Regenerative Shock Absorber*) pada sistem suspensi truk dengan posisi tegak dan bersudut. Parameter yang digunakan oleh Tri Ayu yaitu diameter silinder 5 cm,

diameter batang piston 3 cm, dan diameter pipa 2 mm dengan variasi frekuensi 1 Hz hingga 1.7 Hz dengan kenaikan sebesar 0.2 Hz^[7].

Respon gaya redam pada sistem HMERSA dengan dan tanpa sudut dapat dilihat pada gambar 2.8 dan 2.9.



Gambar 2.8. Grafik perbandingan gaya redam terhadap (a) kecepatan dan (b) percepatan pada sistem hidrolik dengan posisi suspensi tegak



Gambar 2.9. Grafik perbandingan gaya redam terhadap (a) kecepatan dan (b) percepatan pada sistem hidrolik dengan posisi suspensi miring

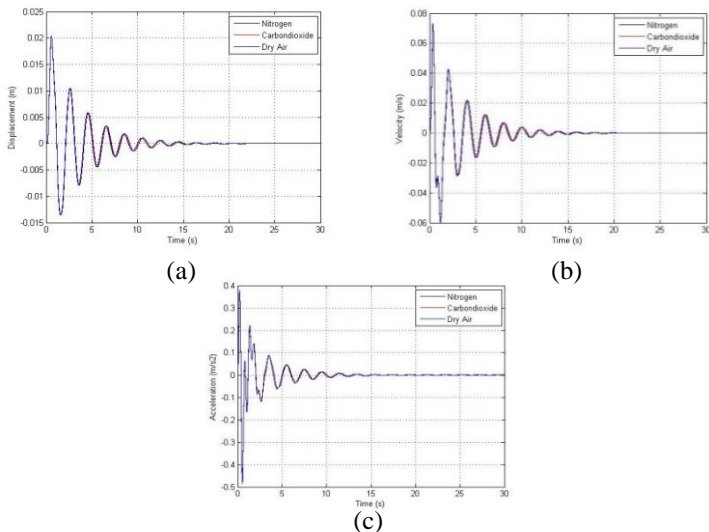
Tabel 2.1. Nilai gaya redam yang dihasilkan pada sistem hidrolik dengan dan tanpa sudut

Suspensi	Kondisi	1 Hz	1.3 Hz	1.5 Hz	1.7 Hz
Depan (dengan sudut)	Ekspansi	1860	2742	3458	4279
	Kompresi	5414	8678	1133e+004	1436e+004
Belakang (tegak)	Ekspansi	2024	3018	3826	4752
	Kompresi	6035	9725	1272e+004	1616e+004

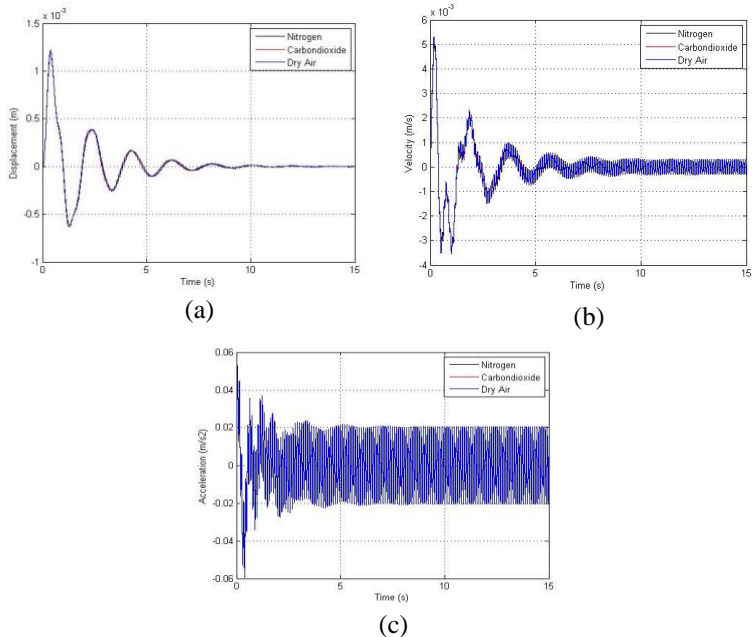
Dari tabel 2.1. dapat dilihat nilai gaya redam yang dihasilkan. Jika dibandingkan, misalnya pada frekuensi 1.7 Hz sistem hidrolik dengan sudut menghasilkan gaya redam yaitu 4279 N pada saat ekspansi. Sedangkan gaya redam yang dihasilkan oleh sistem hidrolik tanpa sudut adalah 4752 N. Terjadi perbedaan nilai gaya redam pada ekspansi dan kompresi karena pengaruh dari luasan diameter silinder hidrolik dan piston hidrolik. Nilai gaya redam yang paling besar pada suspensi dengan dan tanpa sudut terjadi pada saat frekuensi paling besar yaitu 1.7 Hz. Dapat disimpulkan bahwa dengan adanya sudut, gaya redam yang dihasilkan oleh sistem hidrolik lebih kecil.

Pada tahun 2015, penelitian mengenai sistem suspensi *hydro-pneumatic* telah dilakukan oleh Yunita Hestiningrum dan dimuat dengan judul “Pemodelan dan Analisis Pengaruh Perubahan Parameter Sistem Suspensi *Oleo-Pneumatic* terhadap Gaya Redam dan Gaya Pegas serta Respon Dinamis Penumpang Pesawat Boeing 747-400 saat Proses *Landing* dan *Takeoff*” tetapi diterapkan pada sistem suspensi pesawat terbang. Melalui model matematis dan pemodelan dengan software Matlab, penelitian ini menjelaskan dan membahas karakteristik sistem suspensi *landing gear* pasif dengan perubahan parameter. Input yang digunakan pada tugas akhir ini adalah input sinusoidal dan bump modified.

Dari sistem suspensi oleo-pneumatic didapatkan bahwa semakin kecil luas penampang *orifice* (A_o), maka gaya redam yang dihasilkan akan semakin besar, Semakin besar tekanan awal gas (p_0) yang digunakan pada sistem suspensi *oleo-pneumatic*, maka gaya pegas yang dihasilkan semakin besar. Dan semakin besar volume awal gas (V_0) yang digunakan, maka gaya pegas yang dihasilkan semakin besar. Pada sistem pesawat terbang dengan penambahan system suspensi oleo-pneumatic untuk input bump modified (kondisi landing), seluruh respon merupakan respon transient dan mencapai kondisi steady state kurang dari 25 detik terlihat pada gambar 2.10. Sedangkan untuk input sinusoidal (kondisi takeoff) dengan kecepatan pesawat terbang saat takeoff yaitu sebesar 196 knots = 362,992 km/jam, respon dinamis berupa perpindahan, kecepatan dan percepatan dari penumpang mencapai kondisi steady state sebelum 15 detik terlihat pada gambar 2.11. Dari ketiga jenis gas yang digunakan pada simulasi, hasil dari nilai RMS untuk percepatan getaran penumpang adalah tidak ada keluhan (nyaman) apabila dibandingkan dengan standar ISO 2631.



Gambar 2.10. Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang pesawat terbang terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 5$)



Gambar 2.11 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang pesawat terbang terhadap waktu dengan input sinusoidal^[4]

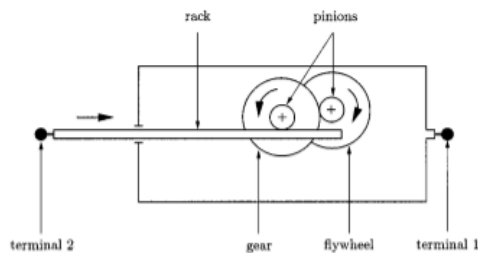
2.2. Konsep *Flywheel* sebagai Peredam

Flywheel merupakan suatu alat mekanis yang digunakan untuk menyimpan energi rotasi yang dapat dimanfaatkan sebagai energi redaman^[9]. *Flywheel* memiliki momen inersia yang melawan perubahan dari kecepatan rotasi.

Penelitian mengenai modifikasi *shock absorber* menggunakan *flywheel* sebagai peredam telah dilakukan oleh Malcolm C. Smith, dkk. dari *University of Cambridge* pada tahun 2002 dan dimuat dalam jurnal *IEE Transactions On Automatic Control* dengan judul “*Synthesis of Mechanical Networks: The Inerter*”. Pada penelitian ini, Malcolm membuat sebuah alat mekanis yang diterapkan sebagai *shock absorber*, disebut dengan

inertor. Konsep dari *inertor* dianalogikan sebagai hubungan antara sistem *mechanical* dengan sistem *electrical*. seperti gaya dengan arus, kecepatan dengan voltase, pegas dengan induktor, *damper* dengan *resistor*, energi kinetik dengan energi listrik, dan energi potensial dengan energi magnetik.

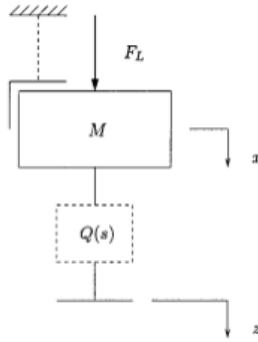
Namun, tidak semua analogi tersebut sesuai dengan kondisi nyata. Ketidaksesuaian itu disebabkan oleh variabel massa yang terdapat pada hubungan gaya-kecepatan (hukum Newton kedua). Nilai variabel massa yang terlalu besar akan menyebabkan analogi tersebut tidak sesuai di kondisi nyata. Untuk mengatasi hal itu, ditambahkan sambungan (*terminal*) yang berfungsi untuk menyeimbangkan percepatan pada *inertor*.



Gambar 2.12. Skema mekanis dari *inertor*

Inertor ini memiliki konstruksi yang sederhana sehingga mudah untuk dirakit. Komponen dari *inertor* terdiri dari *rack*, *pinion*, dan *gear* yang menggerakkan *flywheel* yang kemudian akan berotasi dan menghasilkan gaya inersia.

Agar suatu massa dapat memiliki getaran sinusoidal yang stabil, maka perlu ditambahkan suatu sistem berupa *inertor* pada frekuensi ω_0 konstan yang tidak mengganggu massa tersebut. *Inertor* ini disebut sebagai $Q(s)$, seperti pada gambar 2.13.



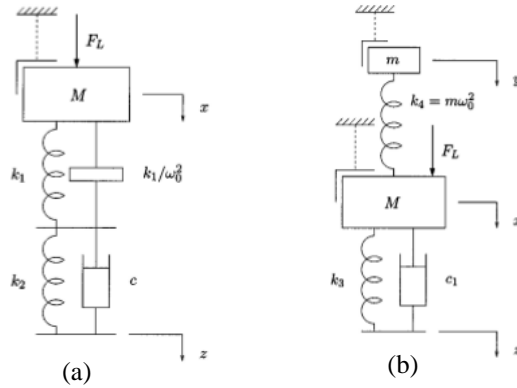
Gambar 2.13. Suatu massa yang belum ditambahkan sistem suspensi

Massa diberi dengan gaya F_L , perpindahan dari massa dan sistem yaitu x dan z . Dalam mendesain sistem $Q(s)$ yang sebenarnya, jika $z = \sin(\omega_0 t)$ dan $x(t) \rightarrow 0$ dengan $t \rightarrow \infty$, persamaan gerak dari massa M dalam transformasi *Laplace* adalah sebagai berikut^[6]:

$$Ms^2\hat{x} = \hat{F}_L + sQ(s)(\hat{z} - \hat{x}) \quad (2.3)$$

$$\hat{x} = \frac{1}{Ms^2 + sQ(s)}\hat{F}_L + \frac{Q(s)}{Ms + Q(s)}\hat{z} \quad (2.4)$$

Selanjutnya, Malcolm membandingkan respon dinamis dari massa yang ditambahkan sistem suspensi *inertor* dengan massa yang ditambahkan sistem suspensi konvensional, seperti pada gambar 2.14.



Gambar 2.14. Massa yang ditambahkan sistem suspensi *inert* (a) dan sistem suspensi konvensional (b)

Pada gambar 2.14. (b) dimana peredam getaran terdiri dari *spring-mass* yang sistemnya telah terhubung dengan massa M . Dalam transformasi *Laplace*, persamaan geraknya menjadi:

$$ms^2\hat{y} = k_4(\hat{x} - \hat{y}) \quad (2.5)$$

$$Ms^2\hat{x} = \hat{F}_L + k_4(\hat{y} - \hat{x}) + (k_3 + c_1s)(\hat{z} - \hat{x}) \quad (2.6)$$

Dengan \hat{x} dan \hat{y} sebagai berikut:

$$\hat{x} = (1 + s^2/\omega_0^2)\hat{y} \quad (2.7)$$

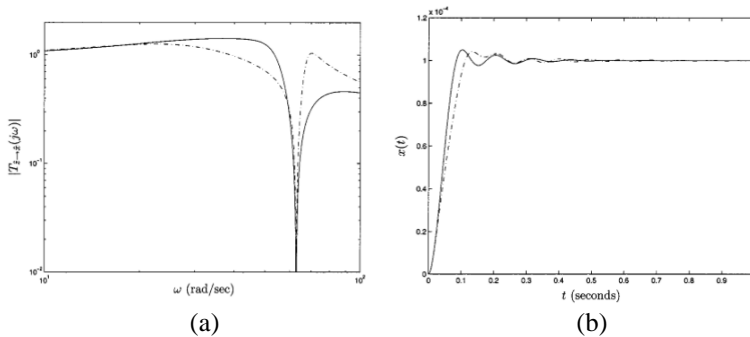
$$\hat{y} = \frac{(k_3 + c_1s)\hat{z} + \hat{F}_L}{(Ms^2 + c_1s + (k_3 + k_4))(1 + s^2/\omega_0^2) - k_4} \quad (2.8)$$

Saat $F_L = 0$, massa M mempunyai respon amplitudo *steady-state* nol pada eksitasi sinusoidal z dari unit amplitudo dan frekuensi ω_0 ketika amplitudo *steady-state* yang diterima oleh massa m adalah $\left(\sqrt{k_3^2 + c_1^2\omega_0^2}\right)/k_4$. Hal ini terbukti bahwa

amplitudo osilasi dari massa m bernilai besar jika k_4 sebanding dengan $\sqrt{k_3^2 + c_1^2 \omega_0^2}$. Dalam pelaksanaannya, m dan k_4 membutuhkan nilai yang cukup besar untuk menghindari osilasi yang berlebihan pada m . Kondisi tersebut menimbulkan kerugian yang tidak diinginkan ketika menambahkan nilai massa berlebih pada M .

Untuk menghindari kerugian tersebut, solusinya adalah menggunakan *inertor* seperti yang terlihat pada gambar 2.14. (a). Kerugian tersebut dapat teratasi oleh *inertor* $Q(s)$ yang ditambahkan pada massa M . k_1 mempengaruhi *transient response* pada eksitasi dari sistem tersebut, juga respon pada beban F_L . Secara khusus, kekakuan pegas statis yang berada di bawah beban F_L besarnya sama dengan $k_1 k_2 / (k_1 + k_2)$, dengan nilai k_1 tidak boleh terlalu kecil dibandingkan dengan nilai k_2 untuk massa M . Tidak seperti peredam getaran pada gambar 2.14. (b) yang tidak memiliki dasaran untuk meningkatkan k_1 di atas *ground* pada penambahan massa ke dalam sistem.

Berdasarkan pada pembahasan penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa *inertor* memberikan alternatif untuk mengatasi masalah peredaman getaran yang masih konvensional (standar). Hasil respon frekuensi dan respon perpindahan *inertor* lebih stabil dibandingkan dengan sistem suspensi konvensional, seperti yang terlihat pada grafik gambar 2.15.



Gambar 2.15. Grafik respon frekuensi (a) dan respon perpindahan (b) pada sistem suspensi *inertor* (-) dan sistem suspensi konvensional (-.)

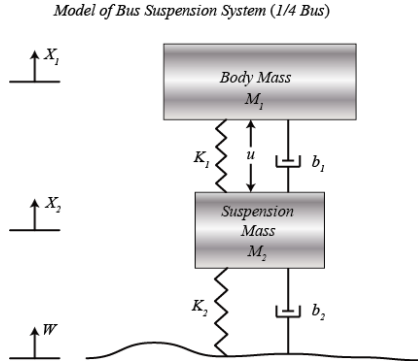
Setelah mengalami proses perkembangan yang sangat pesat, *inertor* untuk pertama kalinya diaplikasikan tahun 2005 saat *Grand Prix* di Spanyol oleh *driver* Kimi Raikkonen. Pada saat itu Kimi Raikkonen bergabung dengan tim *McLaren* yang menggunakan *Mercedes MP4-20* dan mendapatkan kemenangan. Kemudian pada tahun 2012 *inertor* digunakan pada *IndyCar racing* untuk pertama kalinya. Saat ini ilmuwan dari *Cambridge University* bekerja dengan beberapa mitra untuk mengembangkan aplikasi lain dari *inertor*.



Gambar 2.16. *Rack and pinion inertor* yang dibuat di *Cambridge University*

2.3. Pemodelan Dinamis $\frac{1}{4}$ Kendaraan

Dalam perancangan sistem suspensi kendaraan, model seperempat kendaraan (salah satu dari empat roda) digunakan untuk menyederhanakan masalah dengan sistem pegas-peredam.



Gambar 2.17. Model seperempat kendaraan dari bus
(Sumber: *researchgate.net*)

Persamaan gerak dari gambar 2.17:

$$M_1 \ddot{x}_1 = -b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_1(x_1 - x_2) \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} M_2 \ddot{x}_2 &= b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1(x_1 - x_2) \\ &+ b_2(\dot{W} - \dot{x}_2) + k_2(W - x_2) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Kemudian dari persamaan tersebut, diubah menjadi bentuk *state variable equation*:

$$\dot{x}_1 = v_1$$

$$\dot{x}_2 = v_2$$

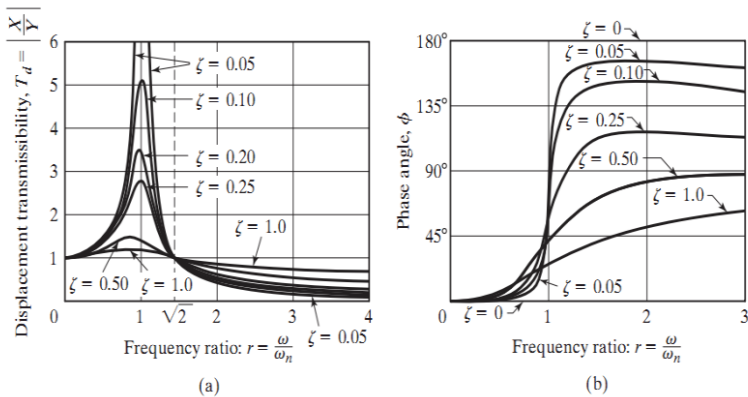
$$\dot{W} = w$$

$$\dot{v}_1 = \frac{1}{M_1} [-b_1(v_1 - v_2) - k_1(x_1 - x_2)] \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} \dot{v}_2 = \frac{1}{M_2} [&b_1(v_1 - v_2) + k_1(x_1 - x_2) + b_2(w - v_2) + \\ &k_2(W - x_2)] \end{aligned} \quad (2.13)$$

2.4. Transmisibilitas Perpindahan (*Displacement Transmissibility*)

Rasio dari amplitudo respon $X_{p(t)}$ terhadap *base motion* $y(t)$, yaitu $\frac{X}{Y}$, disebut dengan *displacement transmissibility*^[5]. *Displacement transmissibility* adalah seberapa besar respon gerakan yang ditransmisikan dari input jalan ke massa kendaraan dengan variasi frekuensi saat berkendara. Grafik transmisibilitas perpindahan dapat dilihat pada gambar 2.18. di bawah ini.



Gambar 2.18. Grafik Variasi T_d dan ϕ terhadap r ^[5]

Berikut ini merupakan karakteristik yang didapat dari gambar 2.18.a, yaitu:

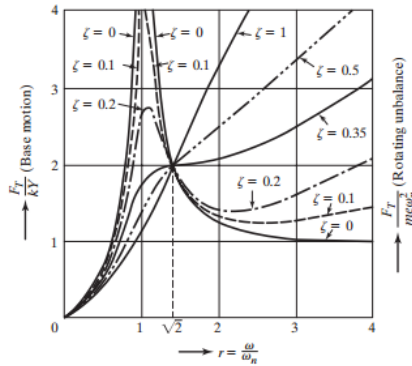
1. $T_d = 1$ saat $r = 0$ dan mendekati 1 untuk nilai r yang sangat kecil
2. Untuk sistem yang tak teredam ($\zeta = 0$), T_d menuju tak hingga saat $r = 1$ (resonansi)
3. Nilai $T_d < 1$ ketika $r = \sqrt{2}$, untuk semua nilai ζ
4. Nilai $T_d = 1$ ketika $r = \sqrt{2}$, untuk semua nilai ζ
5. Untuk $r < \sqrt{2}$, semakin kecil nilai ζ maka akan semakin besar T_d -nya. Sebaliknya, untuk $r > \sqrt{2}$, semakin kecil nilai ζ maka akan semakin kecil T_d -nya

6. Nilai dari T_d mencapai maksimum untuk $0 < \zeta < 1$ pada saat $r = r_m < 1$. Perumusan r_m dapat ditulis sebagai berikut:

$$r_m = \frac{1}{2\zeta} [\sqrt{1 + 8\zeta^2} - 1]^{\frac{1}{2}} \quad (2.14)$$

2.5. Transmisibilitas Gaya (*Force Transmissibility*)

Rasio dari F_T/kY diketahui sebagai *force transmissibility* dengan catatan gaya yang ditransmisikan berada pada fase yang sama dengan gerakan dari massa $x(t)$. Variasi dari gaya yang ditransmisikan ke permukaan jalan (*base*) dengan rasio frekuensi r dapat dilihat pada gambar 2.19. untuk nilai *damping ratio* (ζ) yang berbeda.



Gambar 2.19. *Force transmissibility*

Gaya, F , ditransmisikan ke permukaan jalan atau tumpuan bergantung pada reaksi dari pegas (*spring*) dan *dashpot*. Gaya tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$F = k(x - y) + c(\dot{x} - \dot{y}) = -m\ddot{x} \quad (2.15)$$

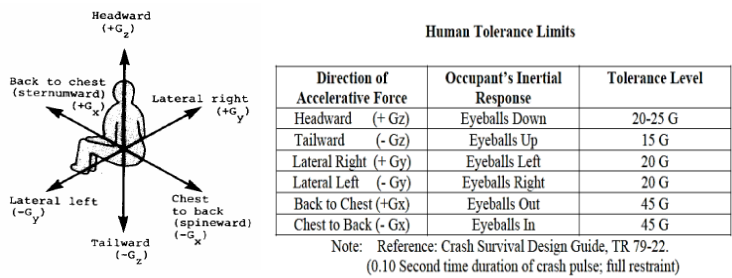
$$F = m\omega^2 X \sin(\omega t - \phi) = F_T \sin(\omega t - \phi) \quad (2.16)$$

Dimana F_T adalah amplitudo atau nilai maksimum dari gaya yang ditransmisikan ke permukaan jalan, dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{F_T}{kY} = r^2 \left[\frac{1 + (2\zeta r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2} \right]^{1/2} \quad (2.17)$$

2.6. Pengaruh Percepatan Kendaraan terhadap Kenyamanan Pengendara

Gerakan utama yang dialami pengemudi selama mengemudi yaitu berupa percepatan atau perlambatan dan getaran. Unit dasar yang digunakan sebagai ukuran dari percepatan yang dialami manusia adalah berbasis pada gaya gravitasi. Seseorang yang jatuh bebas dimana percepatan jatuhnya adalah 9.81 m/s^2 dikatakan mengalami percepatan sebesar 1 g (satu gravitasi). Toleransi manusia terhadap percepatan ditunjukkan pada gambar 2.20. Gambar tersebut menunjukkan level percepatan rata-rata untuk bermacam arah gerakan yang mampu ditahan oleh tubuh manusia. Informasi ketahanan badan manusia terhadap percepatan merupakan hal yang sangat penting sebagai referensi dalam perancangan ketahanan bodi kendaraan terhadap *impact*. Jika pada saat kendaraan mengalami *impact* dimana pengemudi atau penumpang mendapat percepatan atau perlambatan melebihi yang mampu didukung oleh badan, maka akan dapat membahayakan pengemudi dan penumpang kendaraan tersebut.



Gambar 2.20. Ketahanan badan manusia terhadap percepatan linier yang dapat diterima

Untuk kriteria kenyamanan berdasarkan besar percepatan menurut standar ISO 2631, ditampilkan pada tabel berikut:

Tabel 2.2. Reaksi kenyamanan terhadap percepatan – ISO 2631

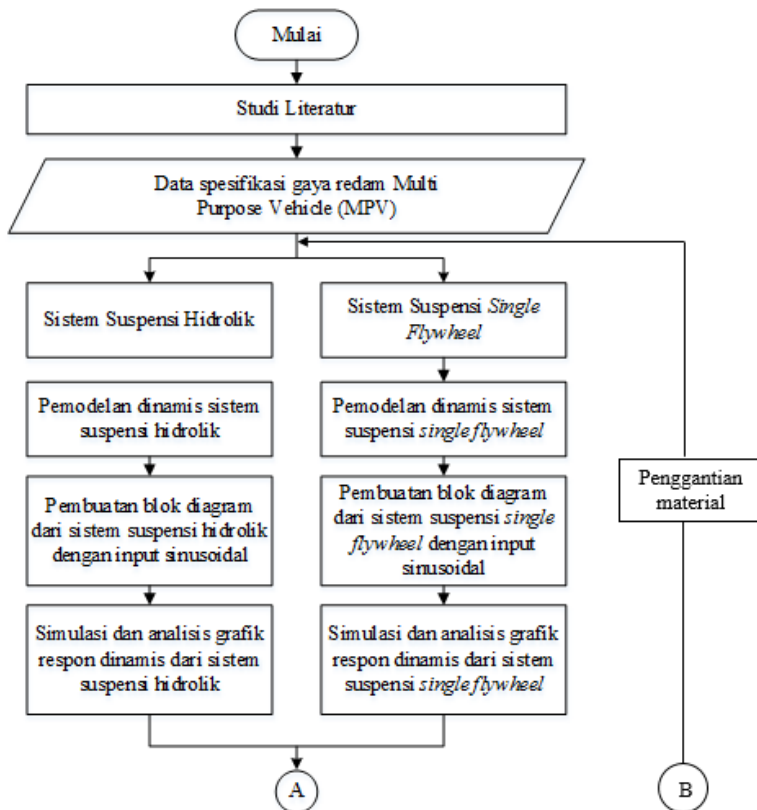
No.	Getaran	Keterangan
1.	$a < 0.315 \text{ m/s}^2$	Tidak ada keluhan
2.	$0.315 \text{ m/s}^2 < a < 0.63 \text{ m/s}^2$	Sedikit tidak nyaman
3.	$0.5 \text{ m/s}^2 < a < 0.1 \text{ m/s}^2$	Agak tidak nyaman
4.	$0.8 \text{ m/s}^2 < a < 0.16 \text{ m/s}^2$	Tidak nyaman
5.	$1.25 \text{ m/s}^2 < a < 2.5 \text{ m/s}^2$	Sangat tidak nyaman
6.	$a > 2 \text{ m/s}^2$	Amat sangat tidak nyaman

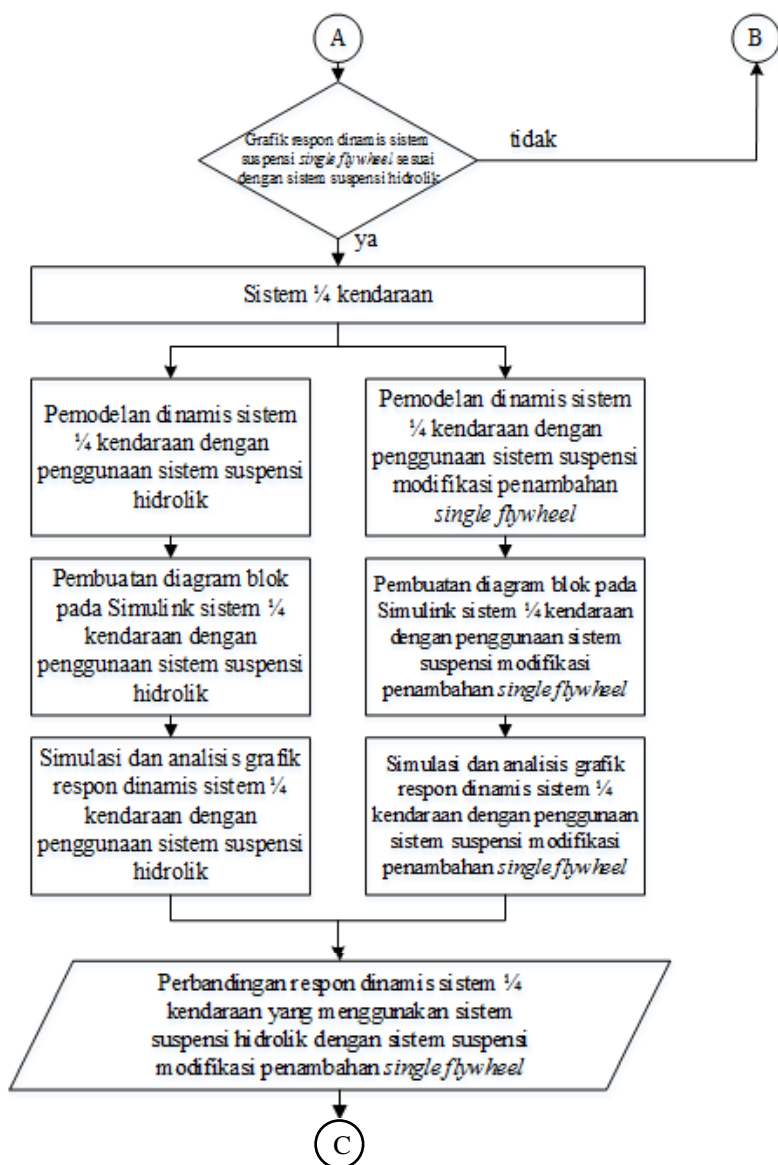
Selain berdasarkan kenyamanan, acuan baik tidaknya suspensi kendaraan juga dilihat berdasarkan kenyamanan. Ditinjau dari segi keamanan, suspensi dikatakan relatif aman jika roda dan permukaan jalan melekat dengan baik atau diusahakan defleksi pada roda seminimal mungkin^[8]. Defleksi maksimum dari suspensi depan sebesar 10 cm, sedangkan untuk suspensi belakang maksimum 12 cm.

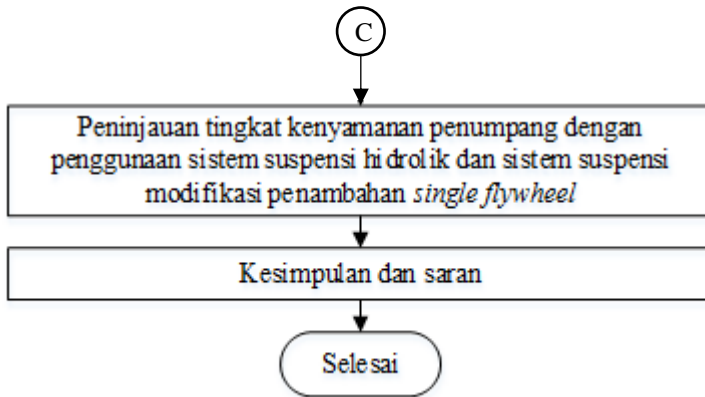
BAB III METODOLOGI

3.1. Metode Penelitian

Penulisan tugas akhir ini dilakukan untuk mengetahui perbandingan respon dinamis berupa perpindahan, kecepatan, dan percepatan sistem suspensi *Multi Purpose Vehicle* (MPV) atau mobil penumpang melalui *shock absorber* modifikasi penambahan *single flywheel* terhadap sistem suspensi hidrolik. Dalam proses analisis dilakukan beberapa langkah yang ditunjukkan oleh diagram alir pada gambar 3.1.







Gambar 3.1. Diagram alir penyelesaian tugas akhir

Metode pelaksanaan tugas akhir ini secara umum ditunjukkan pada gambar 3.1, dimulai dari studi literatur dan studi lapangan mengenai sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi *single flywheel*. Langkah selanjutnya yaitu pemodelan dinamis untuk sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi *single flywheel*. Kemudian membuat blok diagram pada MATLAB Simulink dengan *input* sinusoidal. Dari Simulink tersebut, didapatkan grafik respon dinamis dari sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi *single flywheel*. Grafik respon dinamis dari sistem suspensi *single flywheel* ini disesuaikan dengan sistem suspensi hidrolik, kemudian dimodifikasi dengan susunan tertentu. Untuk selanjutnya, sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* dipasangkan pada sistem seperempat kendaraan MPV dan menggunakan langkah yang sama, yaitu dengan membuat model fisik dan matematis. Kemudian dilanjutkan dengan membuat pemodelan dinamis dari sistem tersebut. Selanjutnya membuat blok diagram dengan *input* sinusoidal. Dari simulasi tersebut didapatkan respon dinamis dari seperempat kendaraan MPV dengan penggunaan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*. Setelah itu dilakukan analisis dan perbandingan grafik kedua sistem suspensi tersebut, serta membuat kesimpulan

berdasarkan hasil yang didapat yang berhubungan dengan kenyamanan penumpang dan memberikan saran untuk penelitian selanjutnya.

3.2. Tahap Studi Literatur

Dalam penulisan tugas akhir ini diperlukan referensi-referensi yang dapat menunjang dalam proses analisis sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* pada kendaraan MPV. Oleh karena itu, dilakukan studi literatur untuk menambah wawasan, pengetahuan, dan landasan mengenai permasalahan yang akan dibahas. Adapun materi dari studi literatur yang mendukung dalam penulisan tugas akhir ini yaitu mekanika getaran dasar, konsep *flywheel* sebagai peredam, pemodelan sistem dinamis, sistem mekanis getaran torsional, sistem suspensi hidrolik, serta pembuatan blok diagram pada program MATLAB Simulink. Sedangkan studi lapangan yang dilakukan meliputi penentuan nilai parameter dari sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* yang digunakan dalam pemodelan dan simulasi sistem. Nilai parameter tersebut adalah berupa data teknis dari sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* yang meliputi dimensi *shock absorber*, massa kendaraan MPV saat kosong dan massa maksimum kendaraan MPV dengan adanya penumpang, dan kecepatan saat berjalan dari kendaraan MPV.

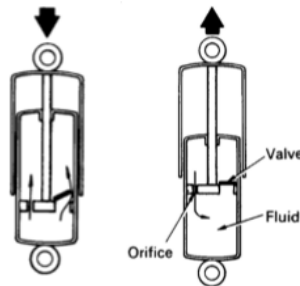
Referensi untuk studi literatur didapat dari buku, jurnal-jurnal ilmiah, maupun penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan. Sedangkan studi lapangan meliputi penentuan dimensi pada kendaraan MPV didapat dari data hasil penelitian oleh kelompok yang membuat perancangan alat terkait.

3.3. Pemodelan dan Simulasi Sistem Suspensi Hidrolik dan Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan *Single Flywheel*

3.3.1. Pemodelan Fisik Sistem Suspensi Hidrolik dan Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan *Single Flywheel*

a. Sistem Suspensi Hidrolik

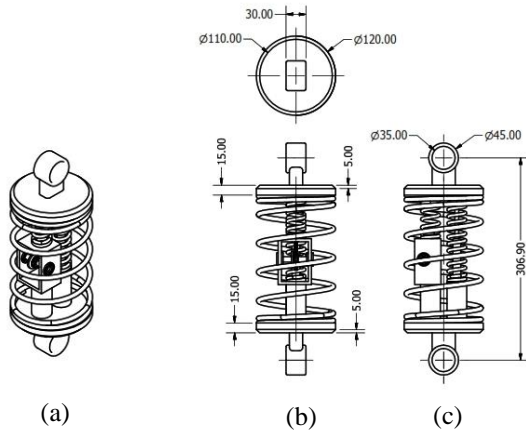
Model sistem suspensi hidrolik pada kendaraan MPV digambarkan seperti pada gambar 3.2. Peredam (*absorber*) adalah komponen utama dari sistem pasif. Sistem ini terdiri dari ruang bawah dan atas dengan luasan tertentu. Sistem suspensi bekerja dalam dua siklus yaitu siklus kompresi dan siklus ekspansi.



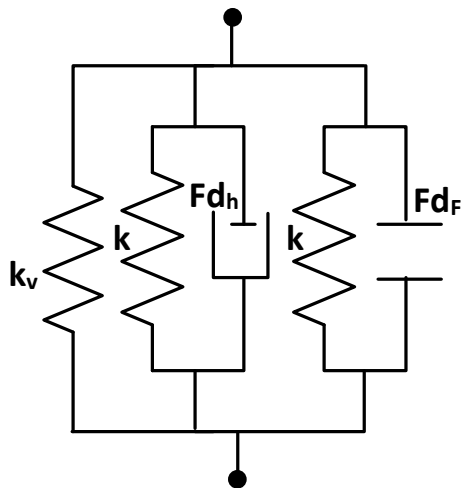
Gambar 3.2. Model fisik sistem suspensi hidrolis

b. Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan *Single Flywheel*

Model sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* digambarkan seperti gambar 3.3. Sistem suspensi tersebut merupakan gabungan antara sistem suspensi hidrolik dengan sistem suspensi *single flywheel*. Sistem suspensi *single flywheel* terdiri dari *rack* yang akan menggerakkan *pinion*, kemudian *flywheel* yang berada pada poros yang sama dengan *pinion* akan ikut bergerak. Penggabungan kedua sistem suspensi tersebut dirangkai sesuai dengan susunan pada gambar 3.4.



Gambar 3.3. Model fisik sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* (a) tampak isometrik, (b) tampak samping, dan (c) tampak depan



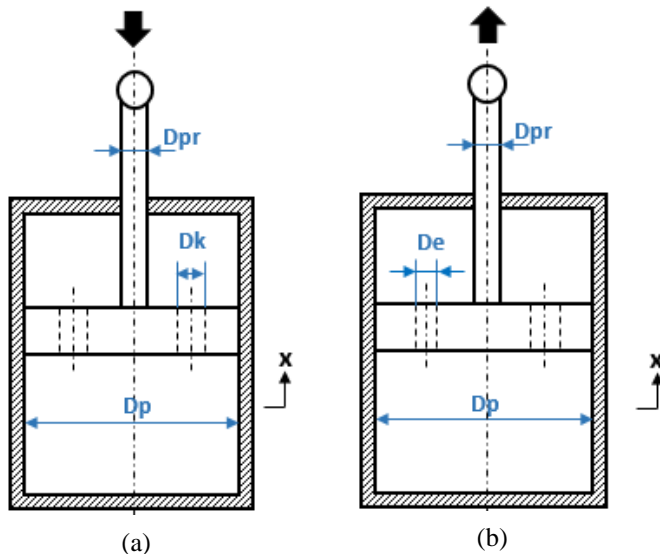
Gambar 3.4. Susunan sistem suspensi modifikasi

Pada susunan sistem suspensi modifikasi tersebut, k_v merupakan koefisien pegas dari kendaraan mobil, k merupakan koefisien pegas yang terhubung pada suspensi hidrolik dan suspensi *single flywheel*, F_{dh} merupakan gaya redam sistem suspensi hidrolik, dan F_{df} merupakan gaya redam sistem suspensi *single flywheel*.

3.3.2. Pemodelan Dinamis dari Sistem Suspensi Hidrolik dan Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan *Single Flywheel*

a. Sistem Suspensi Hidrolik

Pemodelan dinamis untuk sistem suspensi hidrolik ini seperti terlihat pada gambar 3.5., meliputi silinder hidrolik, piston, *orifice*, dan fluida kerja di dalamnya yaitu minyak.



Gambar 3.5. Model dinamis sistem suspensi hidrolik (a) siklus kompresi dan (b) siklus ekspansi

Keterangan:

D_{pr} : diameter piston rod

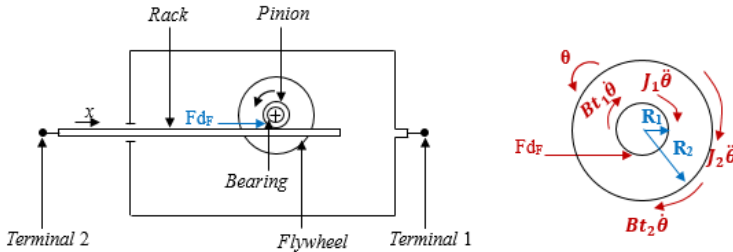
D_k : diameter kompresi

D_e : diameter ekspansi

D_p : diameter piston

b. Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan *Single Flywheel*

Pemodelan dinamis untuk sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* seperti terlihat pada gambar 3.6, meliputi *terminal*, *rack*, *bearing*, *pinion*, dan *flywheel*.



Gambar 3.6. Model dinamis sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*

3.3.3. Pembuatan Blok Simulasi Sistem Suspensi Hidrolik dan Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan *Single Flywheel*

a. Sistem Suspensi Hidrolik

Setelah mendapatkan persamaan gerak dari sistem, langkah selanjutnya yaitu membuat blok simulasi. Berikut merupakan parameter yang digunakan untuk membuat simulasi sistem suspensi hidrolik:

Tabel 3.1. Parameter sistem suspensi hidrolik

Parameter	Nilai	Keterangan
Diameter ekspansi	0.0028 m	Untuk F_d
Diameter kompresi	0.005 m	Untuk F_d
Diameter piston	0.04 m	Untuk F_d
Diameter piston <i>rod</i>	0.03 m	Untuk F_d
Massa jenis minyak	860 kg/m ³	Untuk F_d

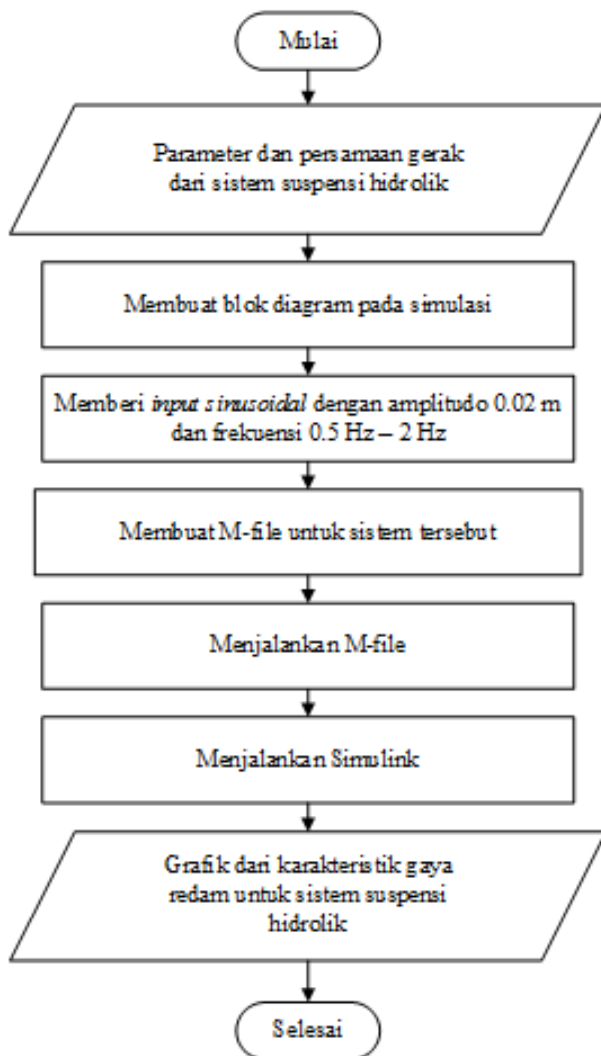
b. Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan *Single Flywheel*

Berikut merupakan parameter yang digunakan untuk membuat simulasi sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*:

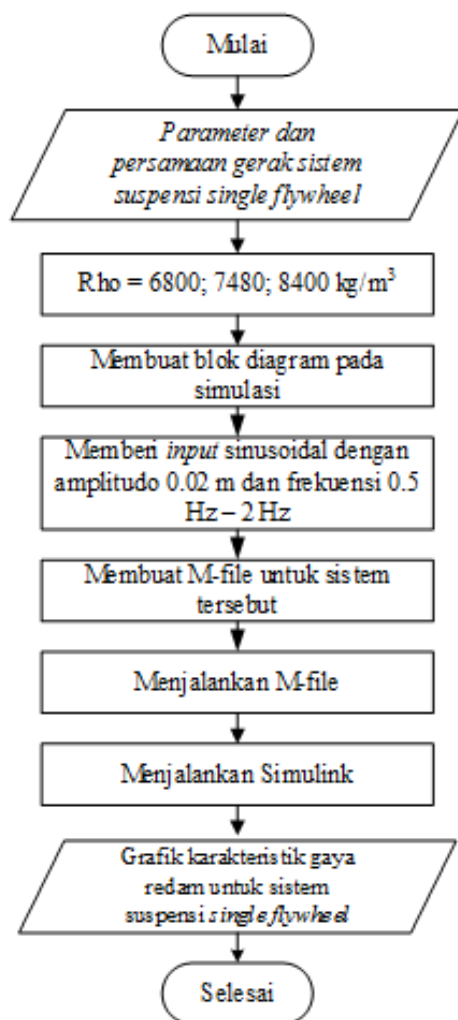
Tabel 3.2. Parameter sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*

Parameter	Nilai	Keterangan
Ketebalan <i>flywheel</i>	30 mm	Untuk F_d
Ketebalan <i>pinion</i>	30 mm	Untuk F_d
Diameter <i>flywheel</i>	40 mm	Untuk F_d
Diameter <i>pinion</i>	30 mm	Untuk F_d
Konstanta redaman <i>bearing</i>	27	Untuk F_d

Proses pembuatan blok diagram pada Simulink dijelaskan berupa diagram alir pada gambar 3.7. untuk sistem suspensi hidrolik, gambar 3.8. untuk sistem suspensi *single flywheel*. *Input* yang digunakan yaitu *input* sinusoidal dengan amplitudo 0.02 m dan frekuensi perpindahan sistem suspensi 0.5 Hz hingga 2 Hz dengan kenaikan 0.5 Hz. Simulasi pada sistem suspensi *single flywheel* diberi variasi pada nilai densitas sesuai dengan material dari *flywheel*, yaitu *cast iron* (6800 kg/m³), *stainless steel* (7480 kg/m³), dan *brass-casting* (8400 kg/m³).



Gambar 3.7. Diagram alir pembuatan blok diagram Simulink dari sistem suspensi hidrolis



Gambar 3.8. Diagram alir pembuatan blok diagram Simulink dari sistem suspensi *single flywheel*

3.3.4. Analisis Grafik Sistem Suspensi Hidrolik dan Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan *Single Flywheel*

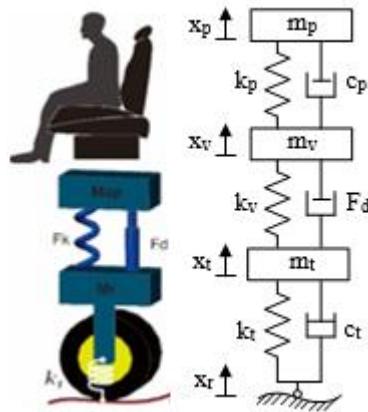
Dari simulasi yang telah dilakukan untuk sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi *single flywheel*, akan didapatkan grafik karakteristik gaya redam, yaitu berupa grafik gaya redam terhadap perpindahan maupun kecepatan.

Setelah itu grafik gaya redam sistem suspensi *single flywheel* disesuaikan dengan grafik gaya redam sistem suspensi hidrolik, kemudian dipilih salah satu hasil yang memiliki gaya redam terbaik untuk selanjutnya digunakan sebagai parameter pada sistem seperempat kendaraan dengan kedua sistem suspensi tersebut.

3.4. Pemodelan dan Simulasi Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dengan Penggunaan Sistem Suspensi Hidrolik dan Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan *Single Flywheel*

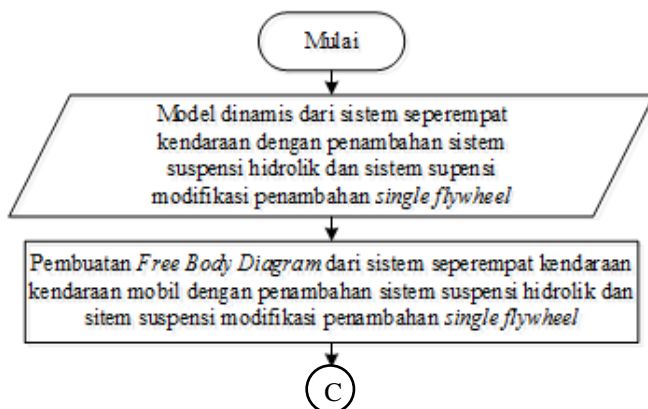
3.4.1. Pemodelan Dinamis dan Pembuatan Persamaan dari Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dengan Penggunaan Sistem Suspensi Hidrolik dan Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan *Single Flywheel*

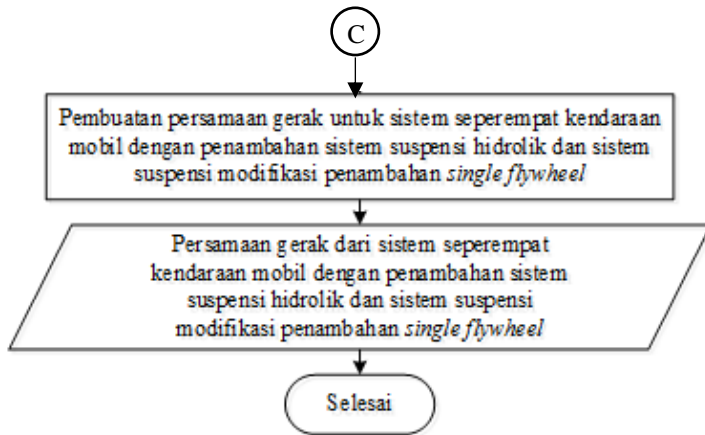
Pemodelan yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah pemodelan seperempat kendaraan dengan tiga derajat kebebasan (3 DOF). Pada gambar 3.9, menunjukkan model seperempat kendaraan mobil yang meliputi, m_p yaitu massa penumpang, m_v yaitu massa kendaraan, m_t yaitu massa ban, k_v merupakan konstanta kekakuan pada sistem suspensi, k_p mewakili konstanta kekakuan dari alas duduk penumpang, k_t yaitu konstanta kekakuan dari ban, c_p merupakan konstanta redaman dari alas duduk penumpang, c_t yaitu konstanta redaman dari ban, dan F_d merupakan gaya redam yang dihasilkan oleh sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*.



Gambar 3.9. Model dinamis dari sistem seperempat kendaraan mobil

Setelah didapatkan model dinamis, maka selanjutnya membuat persamaan gerak dari sistem tersebut. Sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* yang dipasang pada mobil merupakan sistem suspensi yang memiliki gaya redam terbaik. Secara garis besar proses pembuatan persamaan gerak dapat ditransformasikan menjadi diagram alir pada gambar 3.10.





Gambar 3.10. Diagram alir pembuatan persamaan gerak dari sistem seperempat kendaraan mobil dengan penggunaan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*

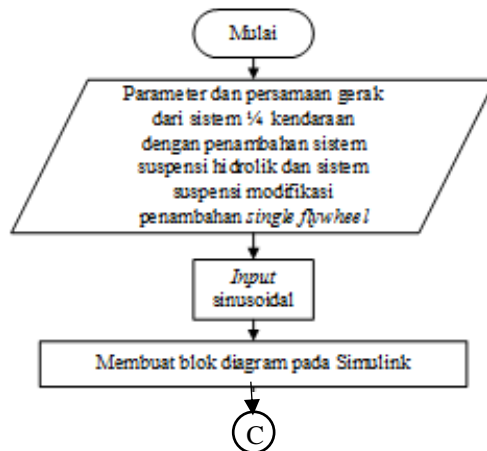
3.4.2. Pembuatan Blok Simulasi Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dengan Penggunaan Sistem Suspensi Hidrolik dan Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan *Single Flywheel*

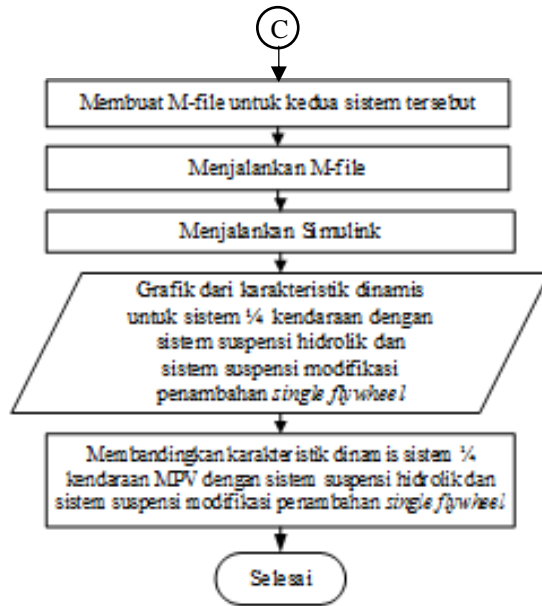
Setelah mendapatkan persamaan gerak dari sistem, langkah selanjutnya yaitu membuat blok simulasi. Parameter yang digunakan untuk sistem seperempat kendaraan yaitu data referensi berdasarkan jurnal ataupun katalog mobil Avanza 1.3S. Parameter yang digunakan untuk sistem seperempat kendaraan terdapat pada tabel 3.3.

Tabel 3.3. Parameter untuk simulasi sistem seperempat kendaraan Avanza 1.3S

Parameter	Nilai	Keterangan
Massa mobil kosong (m_v)	920 kg	-
Massa ban (m_t)	200 kg	-
Koefisien pegas suspensi kendaraan (k_v)	26100 N/m	
Rata-rata massa 1 penumpang (m_p)	70 kg	-
Koefisien pegas alas duduk (k_p)	143.2 N/m	<i>Comfort Mate Foam Seat</i>
Koefisien damping alas duduk (c_p)	1408 N.s/m	
Koefisien pegas ban (k_t)	212185 N/m	<i>Radial Tire dengan tekanan 28 psi</i>
Koefisien damping ban (c_t)	3434 N.s/m	
Koefisien pegas suspensi hidrolik dan <i>flywheel</i> (k)	90000 N/m	-

Proses pembuatan blok diagram Simulink dijelaskan berupa diagram alir pada gambar 3.11. *Input* yang digunakan yaitu *input* sinusoidal.





Gambar 3.11. Diagram alir proses pembuatan blok Simulink dari sistem seperempat kendaraan dengan penggunaan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*

3.4.3. Analisis Grafik Sistem Seperempat Kendaraan dengan Penggunaan Sistem Suspensi Hidrolik dan Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan *Single Flywheel*

Dari simulasi sistem seperempat kendaraan akan didapatkan respon dinamis, berupa perpindahan, kecepatan, maupun percepatan dari *input* sinusoidal.

Respon dinamis pada sistem suspensi hidrolik dibandingkan dengan respon dinamis pada sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*, diharapkan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* ini lebih mampu mengurangi vibrasi pada bodi mobil akibat energi eksitasi profil permukaan jalan yang tidak rata saat mobil berjalan, sehingga

vibrasi yang diterima oleh penumpang sangat kecil. Selanjutnya dilakukan evaluasi dan pengambilan kesimpulan dari hasil analisis yang berhubungan dengan kenyamanan penumpang dan evaluasi yang telah dilakukan.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV PEMODELAN SISTEM

4.1. Pemodelan Dinamis dan Gaya Redam pada Sistem Suspensi

4.1.1. Pemodelan Dinamis dan Gaya Redam pada Sistem Suspensi Hidrolik

Pemodelan dinamis sistem suspensi hidrolik seperti yang terdapat pada gambar 3.5 meliputi silinder hidrolik, piston, *orifice*, dan fluida kerja. Fluida kerja dalam sistem suspensi ini yaitu minyak, berfungsi sebagai redaman yang akan menghasilkan gaya redam.

Gaya redam yang terjadi pada sistem suspensi hidrolik dipengaruhi oleh energi disipasi dari minyak yang mengalir melalui *orifice*. Minyak tersebut diasumsikan fluida inkompresibel dan ΔP menunjukkan perbedaan tekanan antara ruang bawah dan ruang atas piston. Dari hukum konservasi massa, didapat persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Q_o &= Q_p \\ \zeta \cdot A_o \cdot v_o &= A_p \cdot v_p \\ v_o &= \frac{A_p}{\zeta \cdot A_o} v_p \end{aligned} \quad (4.1)$$

dimana:

- A_o = Luas area *orifice* (m²)
- A_p = Luas area piston (m²)
- v_o = Kecepatan minyak memasuki *orifice* (m/s²)
- v_p = Kecepatan piston (m/s²)
- ζ = Koefisien *discharge orifice*

Apabila ditinjau dari persamaan Bernoulli yaitu sebagai berikut:

$$P_o + \frac{1}{2} \rho v_o^2 + \rho g z_o = P_p + \frac{1}{2} \rho v_p^2 + \rho g z_p$$

$z_o = z_p$, sehingga:

$$\begin{aligned} P_o + \frac{1}{2}\rho v_o^2 &= P_p + \frac{1}{2}\rho v_p^2 \\ P_p - P_o &= \frac{1}{2}\rho(v_o^2 - v_p^2) \\ \Delta P &= \frac{1}{2}\rho(v_o^2 - v_p^2) \end{aligned} \quad (4.2)$$

dimana:

- P_o = Tekanan minyak memasuki *orifice* (N/m²)
- P_p = Tekanan piston (N/m²)
- ρ = Densitas minyak (kg/m³)

Gaya redam sistem suspensi hidrolik (F_{dh}) yang terdiri dari siklus kompresi dan ekspansi didapatkan dari substitusi persamaan 4.1 dan 4.2 ke persamaan hukum Pascal:

- Siklus Ekspansi

$$\begin{aligned} F_{de} &= \Delta P \cdot A_e \\ F_{de} &= \frac{1}{2}\rho(v_o^2 - v_p^2)A_e \\ F_{de} &= \frac{1}{2}\rho\left(\left(\frac{A_p}{A_o}v_p\right)^2 - v_p^2\right)A_e \\ F_{de} &= \frac{1}{2}\rho\left(\left(\frac{A_p - A_{pr}}{A_{oe}}v_p\right)^2 - v_p^2\right)(A_p - A_{pr}) \\ F_{de} &= \frac{1}{2}\rho(A_p - A_{pr})\left(\left(\frac{A_p - A_{pr}}{\zeta \cdot A_{oe}}\right)^2 - 1\right)(v_p^2) \end{aligned} \quad (4.3)$$

- Siklus Kompresi

$$\begin{aligned} F_{dk} &= \Delta P \cdot A_k \\ F_{dk} &= \frac{1}{2}\rho(v_o^2 - v_p^2)A_k \\ F_{dk} &= \frac{1}{2}\rho\left(\left(\frac{A_p}{A_o}v_p\right)^2 - v_p^2\right)A_k \end{aligned}$$

$$F_{dk} = \frac{1}{2} \rho \left(\left(\frac{A_p}{A_{ok}} v_p \right)^2 - v_p^2 \right) A_p$$

$$F_{dk} = \frac{1}{2} \rho (A_p) \left(\left(\frac{A_p}{\zeta \cdot A_{ok}} \right)^2 - 1 \right) (v_p^2) \quad (4.4)$$

dimana:

A_{pr} = Luas piston rod (m²)

4.1.2. Pemodelan Dinamis dan Gaya Redam pada Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan *Single Flywheel*

Pemodelan dinamis untuk sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* terdapat pada gambar 3.6 yang terdiri dari *rack*, *bearing*, *pinion*, dan *flywheel*. Dari model dinamis tersebut, gaya redam sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* (F_{df}) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\Sigma M = 0$$

$$F_{dF} R_1 - J_1 \ddot{\theta} - J_2 \ddot{\theta} - B t_1 \dot{\theta} - B t_2 \dot{\theta} = 0$$

$$F_{dF} R_1 = J_1 \ddot{\theta} + J_2 \ddot{\theta} + B t_1 \dot{\theta} + B t_2 \dot{\theta}$$

$$F_{dF} R_1 = J_1 \frac{\ddot{x}}{R_1} + J_2 \frac{\ddot{x}}{R_2} + B t_1 \frac{\dot{x}}{R_1} + B t_2 \frac{\dot{x}}{R_2}$$

$$F_{dF} = \frac{1}{R_1} \left[\left(\frac{J_1}{R_1} + \frac{J_2}{R_2} \right) \ddot{x} + \left(\frac{B t_1}{R_1} + \frac{B t_2}{R_2} \right) \dot{x} \right] \quad (4.5)$$

Momen inersia dari *pinion* (J_1) dan *flywheel* (J_2) dirumuskan sebagai berikut:

$$J_1 = \frac{1}{2} \rho V_1 R_1^2 \quad (4.6)$$

$$J_2 = \frac{1}{2} \rho V_2 R_2^2 \quad (4.7)$$

dimana:

F_{DF} = Gaya redam suspensi *single flywheel*

J_1 = Momen inersia *pinion*

J_2 = Momen inersia *flywheel*

R_1 = Jari-jari *pinion*

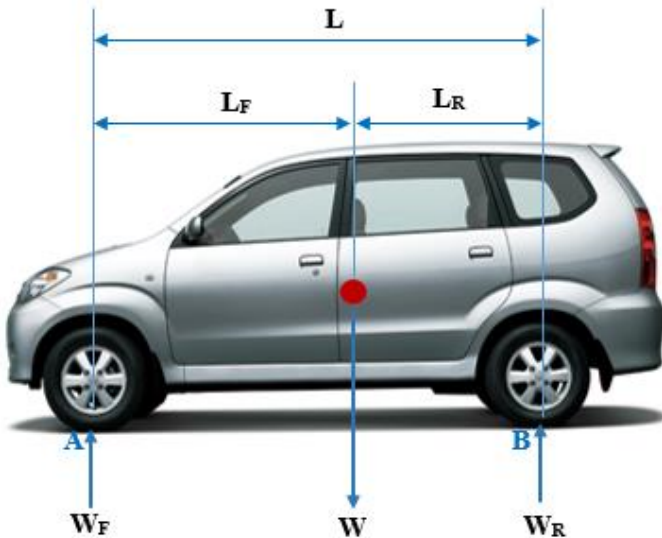
R_2 = Jari-jari *flywheel*

B_{T1} = Koefisien redaman *bearing* 1

- B_{T2} = Koefisien redaman *bearing* 2
 ρ = Densitas material *pinion* dan *flywheel*
 V_1 = Volume *pinion*
 V_2 = Volume *flywheel*

4.2. Pemodelan Dinamis Sistem Seperempat Kendaraan Mobil

Besarnya nilai m_v perlu diketahui terlebih dahulu sebelum melakukan pemodelan dinamis seperempat kendaraan. m_v diasumsikan sebagai massa seperempat kendaraan bagian depan. Untuk mencari nilai m_v yang akan digunakan perlu diketahui massa kendaraan pada bagian depan dengan cara melakukan penimbangan pada bagian roda depan dan roda belakang. Setelah melakukan penimbangan, didapatkan posisi *center of gravity* (CG) pada mobil, sehingga dari CG tersebut dapat diketahui persentase beban pada bagian depan kendaraan seperti pada gambar 4.1.



Gambar 4.1. *Free Body Diagram* kendaraan model *half car*

Pada penimbangan akan didapatkan nilai W_F dan W_R yaitu distribusi berat di bagian depan dan belakang kendaraan.

- Tumpuan roda depan (titik A)

$$\begin{aligned}\Sigma M_A &= 0 \\ W \cdot L_F - W_R \cdot L &= 0 \\ L_F &= \frac{W_R \cdot L}{W}\end{aligned}\quad (4.8)$$

- Tumpuan roda belakang (titik B)

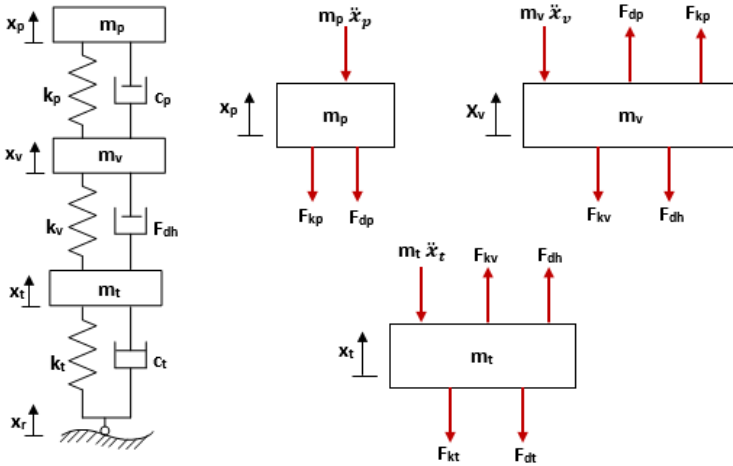
$$\begin{aligned}\Sigma M_B &= 0 \\ W_F \cdot L - W \cdot L_R &= 0 \\ L_R &= \frac{W_F \cdot L}{W}\end{aligned}\quad (4.9)$$

dimana:

- L_F = Jarak CG sampai tumpuan roda depan (m)
- L_R = Jarak CG sampai tumpuan roda belakang (m)
- L = Jarak poros roda depan dan roda belakang (m)
- W_F = Berat kendaraan bagian depan (N)
- W_R = Berat kendaraan bagian belakang (N)
- W = Berat total kendaraan kosong (N)

4.2.1. Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dengan Suspensi Hidrolik

Pada gambar 4.2 menunjukkan model seperempat kendaraan mobil dengan sistem suspensi hidrolik yang meliputi m_p yaitu massa penumpang, m_v yaitu massa kendaraan, m_t yaitu massa ban, k_v merupakan konstanta kekakuan pada sistem suspensi, k_p mewakili konstanta kekakuan dari alas duduk penumpang, k_t yaitu konstanta kekakuan dari ban, c_p merupakan konstanta redaman dari alas duduk penumpang, c_t yaitu konstanta redaman dari ban, dan F_{dh} merupakan gaya redam yang dihasilkan dari sistem suspensi hidrolik.



Gambar 4.2. *Free Body Diagram* sistem seperempat kendaraan mobil dengan suspensi hidrolik

- a. Persamaan matematis dari \mathbf{m}_p adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 -m_p \ddot{x}_p - F_{dp} - F_{kp} &= 0 \\
 m_p \ddot{x}_p + c_p(\dot{x}_p - \dot{x}_v) + k_p(x_p - x_v) &= 0 \\
 m_p \ddot{x}_p &= -c_p(\dot{x}_p - \dot{x}_v) - k_p(x_p - x_v) \\
 \ddot{x}_p &= \frac{1}{m_p} [-c_p(\dot{x}_p - \dot{x}_v) - k_p(x_p - x_v)] \quad (4.10)
 \end{aligned}$$

Persamaan *state variable* dari persamaan 4.10 yaitu:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_p &= v_p \\
 \dot{v}_p &= \frac{1}{m_p} [-c_p(v_p - v_v) - k_p(x_p - x_v)]
 \end{aligned}$$

- b. Persamaan matematis dari \mathbf{m}_v adalah sebagai berikut:

$$-m_v \ddot{x}_v + F_{dp} - F_{dh} + F_{kp} - F_{kv} = 0$$

$$m_v \ddot{x}_v - c_p(\dot{x}_p - \dot{x}_v) + \left(\frac{1}{2} \rho A \left(\left(\frac{A}{\zeta A_o} \right)^2 \right) - 1 \right) (\dot{x}_v - \dot{x}_t)^2 - k_p(x_p - x_v) + k_v(x_v - x_t) = 0$$

$$m_v \ddot{x}_v = c_p(\dot{x}_p - \dot{x}_v) - \left(\frac{1}{2} \rho A \left(\left(\frac{A}{\zeta A_o} \right)^2 \right) - 1 \right) (\dot{x}_v - \dot{x}_t)^2 + k_p(x_p - x_v) - k_v(x_v - x_t)$$

$$\ddot{x}_v = \frac{1}{m_v} \left[c_p(\dot{x}_p - \dot{x}_v) - \left(\frac{1}{2} \rho A \left(\left(\frac{A}{\zeta A_o} \right)^2 \right) - 1 \right) (\dot{x}_v - \dot{x}_t)^2 + k_p(x_p - x_v) - k_v(x_v - x_t) \right] \quad (4.11)$$

Persamaan *state variable* dari persamaan 4.11 yaitu:

$$\begin{aligned} \dot{x}_v &= v_v \\ \dot{v}_v &= \frac{1}{m_v} \left[c_p(v_p - v_v) - \left(\frac{1}{2} \rho A \left(\left(\frac{A}{\zeta A_o} \right)^2 \right) - 1 \right) (v_v - v_t)^2 + k_p(x_p - x_v) - k_v(x_v - x_t) \right] \end{aligned}$$

c. Persamaan matematis dari \mathbf{m}_t adalah sebagai berikut:

$$-m_t \ddot{x}_t - F d_t + F d_h + F k_v - F k_t = 0$$

$$m_t \ddot{x}_t + c_t(\dot{x}_t - \dot{x}_r) - \left(\frac{1}{2} \rho A \left(\left(\frac{A}{\zeta A_o} \right)^2 \right) - 1 \right) (\dot{v}_v - \dot{v}_t)^2 - k_v(x_v - x_t) + k_t(x_t - x_r) = 0$$

$$m_t \ddot{x}_t = -c_t(\dot{x}_t - \dot{x}_r) + \left(\frac{1}{2} \rho A \left(\left(\frac{A}{\zeta A_o} \right)^2 \right) - 1 \right) (\dot{v}_v - \dot{v}_t)^2 + k_v(x_v - x_t) - k_t(x_t - x_r)$$

$$\ddot{x}_t = \frac{1}{m_t} \left[-c_t(\dot{x}_t - \dot{x}_r) + \left(\frac{1}{2} \rho A \left(\left(\frac{A}{\zeta A_o} \right)^2 \right) - 1 \right) (\dot{v}_v - \dot{v}_t)^2 + k_v(x_v - x_t) - k_t(x_t - x_r) \right] \quad (4.12)$$

Persamaan *state variable* dari persamaan 4.12 yaitu:

$$\begin{aligned} \dot{x}_t = v_t \\ \dot{v}_t = \frac{1}{m_t} \left[-c_t(v_t - v_r) + \left(\frac{1}{2} \rho A \left(\left(\frac{A}{\zeta A_o} \right)^2 \right) - 1 \right) (v_v - v_t)^2 + k_v(x_v - x_t) - k_t(x_t - x_r) \right] \end{aligned}$$

4.2.2. Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dengan Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan *Single Flywheel*

Sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* yang telah dipasangkan pada suatu susunan tertentu tercantum pada gambar 3.3. Susunan tersebut terdiri dari pegas, suspensi hidrolik, dan suspensi *flywheel*.

Pada susunan tersebut diketahui besarnya konstanta pegas dan gaya redam ekuivalen sebagai berikut:

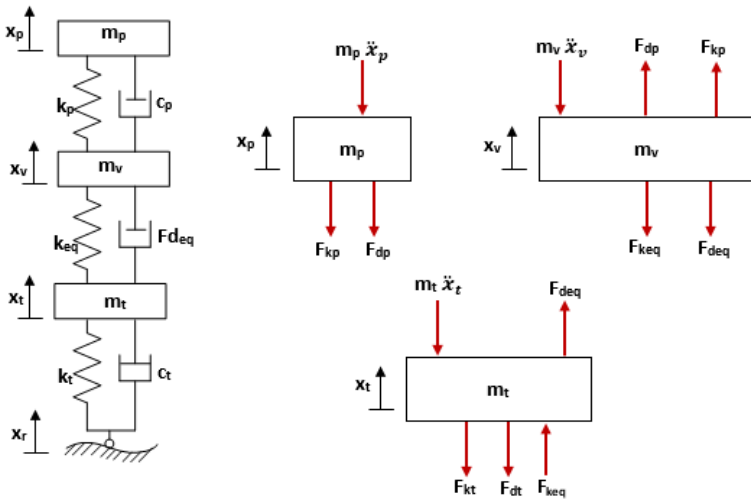
- konstanta pegas ekuivalen (k_{eq})

$$\begin{aligned} \frac{1}{k_{eq}} &= \frac{1}{k_v} + \frac{1}{k} + \frac{1}{k} \\ \frac{1}{k_{eq}} &= \frac{k + k_v + k_v}{k \cdot k_v} \\ \frac{1}{k_{eq}} &= \frac{k + 2k_v}{k \cdot k_v} \\ k_{eq} &= \frac{k \cdot k_v}{k + 2k_v} \end{aligned} \quad (4.13)$$

- gaya redam ekivalen (Fd_{eq})

$$Fd_{eq} = Fd_h + Fd_F \quad (4.14)$$

Pada gambar 4.3 menunjukkan model seperempat kendaraan mobil dengan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* yang meliputi m_p yaitu massa penumpang, m_v yaitu massa kendaraan, m_t yaitu massa ban, k_{eq} merupakan konstanta kekauan pada sistem suspensi, k_p mewakili konstanta kekauan dari alas duduk penumpang, k_t yaitu konstanta kekakuan dari ban, c_p merupakan konstanta redaman dari alas duduk penumpang, c_t yaitu konstanta redaman dari ban, dan F_{deq} merupakan gaya redam yang dihasilkan dari sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*.



Gambar 4.3. *Free Body Diagram* sistem seperempat kendaraan mobil dengan suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*

- a. Persamaan matematis dari \mathbf{m}_p adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 -m_p \ddot{x}_p - Fd_p - Fk_p &= 0 \\
 m_p \ddot{x}_p + c_p(\dot{x}_p - \dot{x}_v) + k_p(x_p - x_v) &= 0 \\
 m_p \ddot{x}_p &= -c_p(\dot{x}_p - \dot{x}_v) - k_p(x_p - x_v) \\
 \ddot{x}_p &= \frac{1}{m_p} [-c_p(\dot{x}_p - \dot{x}_v) - k_p(x_p - x_v)] \quad (4.15)
 \end{aligned}$$

Persamaan *state variable* dari persamaan 4.15 yaitu:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_p &= v_p \\
 \dot{v}_p &= \frac{1}{m_p} [-c_p(v_p - v_v) - k_p(x_p - x_v)]
 \end{aligned}$$

- b. Persamaan matematis dari \mathbf{m}_v adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 -m_v \ddot{x}_v + Fd_p - Fd_{eq} + Fk_p - Fk_{eq} &= 0 \\
 m_v \ddot{x}_v - c_p(\dot{x}_p - \dot{x}_v) \\
 + \left[\left(\frac{1}{2} \rho A \left(\left(\frac{A}{\zeta A_o} \right)^2 \right) - 1 \right) (\dot{x}_v - \dot{x}_t)^2 \right. \\
 + \frac{1}{R_1} \left[\left(\frac{J_1}{R_1} + \frac{J_2}{R_2} \right) (\ddot{x}_v - \ddot{x}_t) \right. \\
 \left. \left. + \left(\frac{Bt_1}{R_1} + \frac{Bt_2}{R_2} \right) (\dot{x}_v - \dot{x}_t) \right] \right] \\
 -k_p(x_p - x_v) + k_{eq}(x_v - x_t) &= 0
 \end{aligned}$$

$$\ddot{x}_v = \frac{1}{m_v + \left(\frac{J_1}{R_1^2} + \frac{J_2}{R_1 R_2}\right)} \left[-c_p(\dot{x}_p - \dot{x}_v) + \left[\left(\frac{1}{2} \rho A \left(\left(\frac{A}{\zeta A_o} \right)^2 \right) - 1 \right) (\dot{x}_v - \dot{x}_t)^2 + \left[\left(-\frac{J_1}{R_1^2} - \frac{J_2}{R_1 R_2} \right) \dot{x}_t + \left(\frac{Bt_1}{R_1} + \frac{Bt_2}{R_2} \right) (\dot{x}_v - \dot{x}_t) \right] \right] - k_p(x_p - x_v) + k_{eq}(x_v - x_t) \right] \quad (4.16)$$

Persamaan *state variable* dari persamaan 4.16 yaitu:

$$\dot{x}_v = v_v$$

$$\begin{aligned} \dot{v}_v = \frac{1}{m_v + \left(\frac{J_1}{R_1^2} + \frac{J_2}{R_1 R_2}\right)} & \left[-c_p(v_p - v_v) \right. \\ & + \left[\left(\frac{1}{2} \rho A \left(\left(\frac{A}{\zeta A_o} \right)^2 \right) - 1 \right) (v_v - v_t)^2 \right. \\ & + \left[\left(-\frac{J_1}{R_1^2} - \frac{J_2}{R_1 R_2} \right) \dot{v}_t \right. \\ & + \left. \left. \left. \left(\frac{Bt_1}{R_1} + \frac{Bt_2}{R_2} \right) (v_v - v_t) \right] \right] - k_p(x_p - x_v) \right. \\ & \left. \left. + k_{eq}(x_v - x_t) \right] \right] \end{aligned}$$

c. Persamaan matematis dari \mathbf{m}_t adalah sebagai berikut:

$$-m_t \ddot{x}_t - Fd_t + Fd_{eq} - Fk_t + Fk_{eq} = 0$$

$$\begin{aligned} & m_t \ddot{x}_t + c_t (\dot{x}_t - \dot{x}_r) \\ & - \left[\left(\frac{1}{2} \rho A \left(\left(\frac{A}{\zeta A_o} \right)^2 \right) - 1 \right) (\dot{x}_v - \dot{x}_t)^2 \right. \\ & + \frac{1}{R_1} \left[\left(\frac{J_1}{R_1} + \frac{J_2}{R_2} \right) (\ddot{x}_v - \ddot{x}_t) \right. \\ & \left. \left. + \left(\frac{Bt_1}{R_1} + \frac{Bt_2}{R_2} \right) (\dot{x}_v - \dot{x}_t) \right] \right] \\ & + k_t (x_t - x_r) - k_{eq} (x_v - x_t) = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{x}_t = & \frac{1}{m_t + \left(\frac{J_1}{R_1^2} + \frac{J_2}{R_1 R_2} \right)} \left[c_t (\dot{x}_t - \dot{x}_r) - \left[\left(\frac{1}{2} \rho A \left(\left(\frac{A}{\zeta A_o} \right)^2 \right) - \right. \right. \right. \\ & 1) (\dot{x}_v - \dot{x}_t)^2 + \left[\left(-\frac{J_1}{R_1^2} - \frac{J_2}{R_1 R_2} \right) \ddot{x}_v + \left(\frac{Bt_1}{R_1} + \frac{Bt_2}{R_2} \right) (\dot{x}_v - \right. \\ & \left. \left. \left. \dot{x}_t) \right] \right] + k_t (x_t - x_r) - k_{eq} (x_v - x_t) \right] \quad (4.17) \end{aligned}$$

Persamaan *state variable* dari persamaan 4.17 yaitu:

$$\dot{x}_t = v_t$$

$$\begin{aligned} \dot{v}_t = & \frac{1}{m_t + \left(\frac{J_1}{R_1^2} + \frac{J_2}{R_1 R_2} \right)} \left[c_t(v_t - v_r) \right. \\ & - \left[\left(\frac{1}{2} \rho A \left(\left(\frac{A}{\zeta A_o} \right)^2 \right) - 1 \right) (v_v - v_t)^2 \right. \\ & + \left[\left(-\frac{J_1}{R_1^2} - \frac{J_2}{R_1 R_2} \right) \dot{v}_v \right. \\ & + \left. \left. \left(\frac{B t_1}{R_1} + \frac{B t_2}{R_2} \right) (v_v - v_t) \right] \right] + k_t(x_t - x_r) \\ & \left. - k_{eq}(x_v - x_t) \right] \end{aligned}$$

4.3. Diagram Blok

Dari persamaan gerak yang diperoleh, dibuat diagram blok yang sesuai dengan persamaan gerak dari masing-masing sistem. Dari diagram blok tersebut akan didapatkan grafik respon masing-masing sistem yang akan dibahas pada bab selanjutnya.

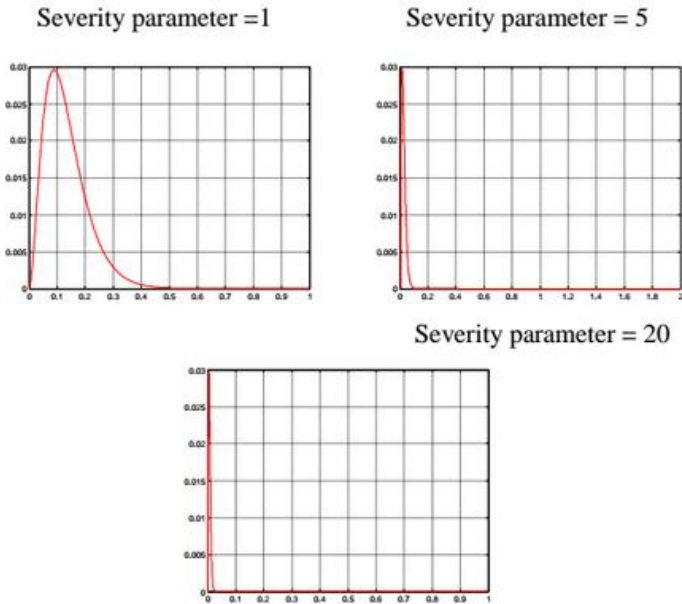
4.3.1. Input yang Digunakan

Pada tugas akhir ini akan dilakukan simulasi untuk sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*, juga sistem seperempat kendaraan mobil dengan penggunaan kedua sistem suspensi tersebut. Pada saat pemodelan pada program simulasi digunakan dua macam *input*, yang pertama *input* sinusoidal yang akan menghasilkan respon *steady state*. Kedua, *input bump* yang telah dimodifikasi (*bump modified*) yang

akan menghasilkan respon *transient*. Persamaan dari kedua *input* tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

- *Input bump modified*

$$y(t) = Y 0.37 e^2(\gamma \omega_0 t) e^{-\gamma \omega_0 t} \quad (4.18)$$



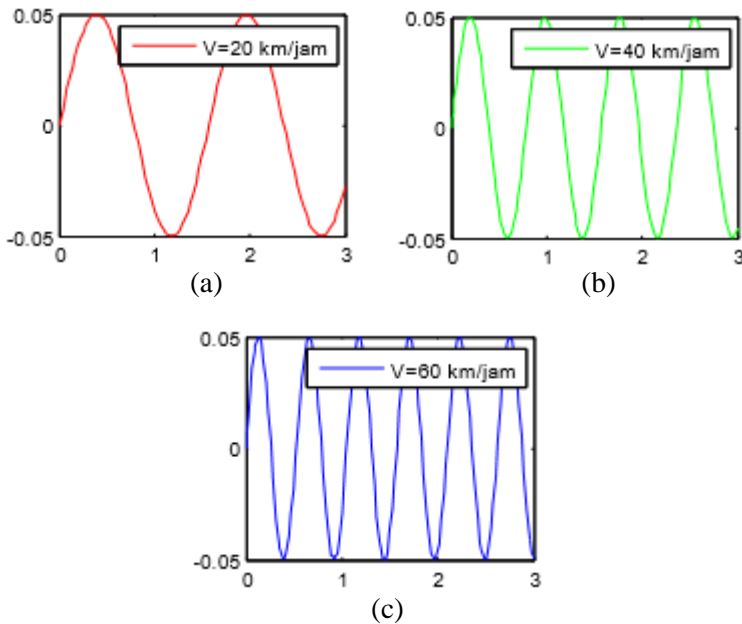
Gambar 4.4. Profil jalan dengan *input bump modified* (a) $\gamma = 1$, (b) $\gamma = 5$, dan (c) $\gamma = 20$

Input ini merupakan fungsi dari γ (*severity parameter*), yaitu 1 untuk *low impact* atau untuk kendaraan dengan kecepatan sekitar 7 km/jam, 5 untuk *less severe impact* atau untuk kendaraan dengan kecepatan sekitar 36 km/jam, dan 20 untuk *more severe impact* atau untuk kendaraan dengan kecepatan sekitar 72 km/jam.

Sedangkan ω_0 adalah $\sqrt{\frac{k_v}{m_v}}$. Nilai Y merupakan amplitudo yang digunakan. Amplitudo yang digunakan dalam simulasi yaitu 2 cm.

- *Input Sinusoidal*

$$y(t) = Y \sin(\omega t) \quad (4.19)$$



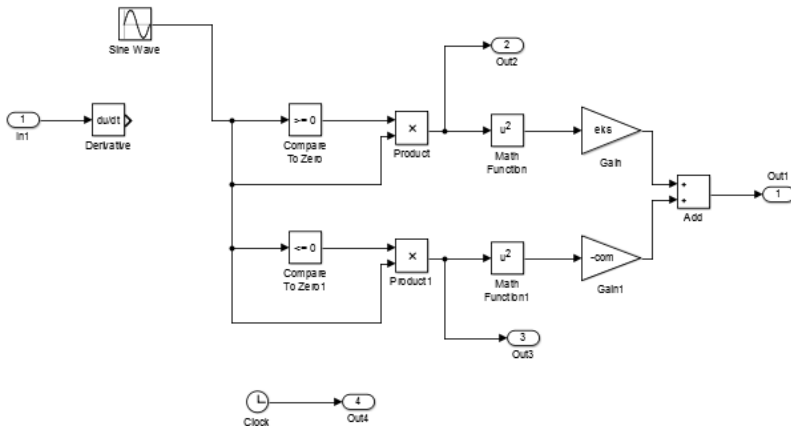
Gambar 4.5. Profil jalan dengan *input* sinusoidal pada kecepatan (a) 20 km/jam, (b) 40 km/jam, dan (c) 60 km/jam

Pada persamaan 4.19, nilai Y merupakan amplitudo yang digunakan, yaitu sebesar 2 cm. Besar frekuensi akan divariasikan dengan panjang gelombang (λ) sebesar 10 m. Pada *input* sinusoidal tersebut digunakan empat macam frekuensi yang masing-masing mewakili kecepatan kendaraan yang berbeda (20

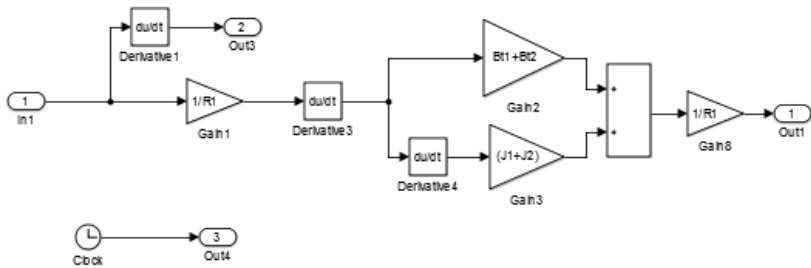
km/jam, 40 km/jam, 60 km/jam, dan 80 km/jam), menggunakan rumus $\omega = 2\pi \frac{v}{\lambda}$ dalam satuan rad/s.

4.3.2. Diagram Blok Sistem Suspensi

Untuk melakukan simulasi pada sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* hanya menggunakan *input* sinusoidal. Parameter yang digunakan pada sistem suspensi hidrolik telah tercantum pada tabel 3.1, sedangkan untuk parameter sistem suspensi modifikasi *single flywheel* tercantum pada tabel 3.2.



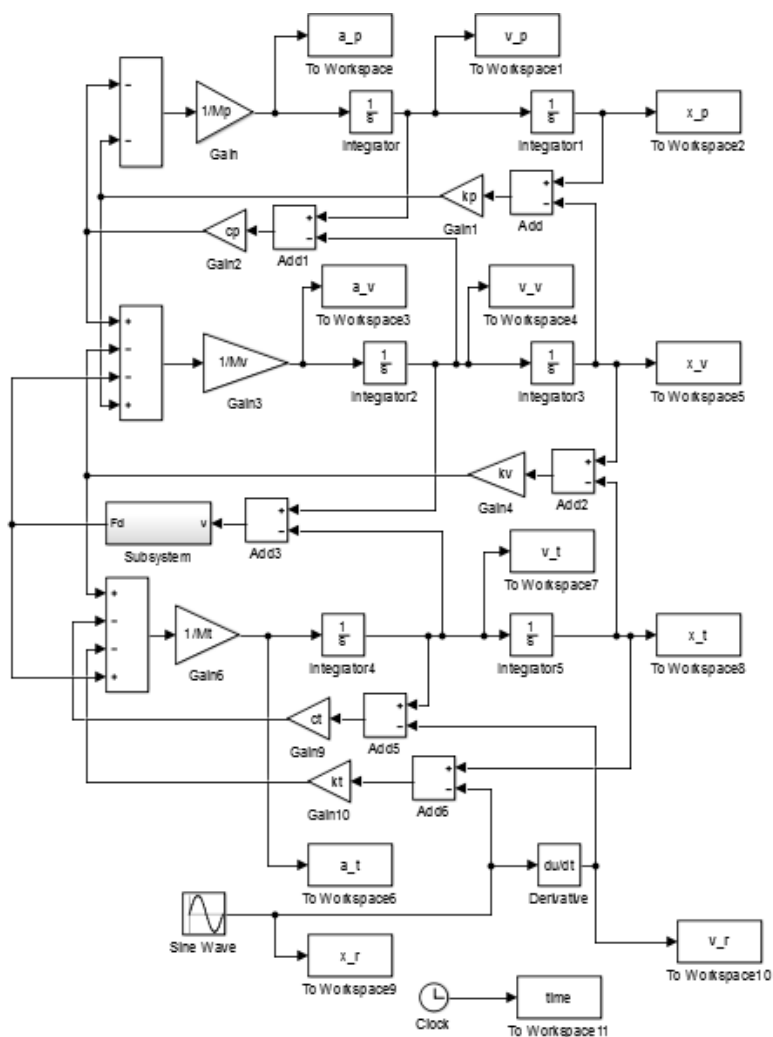
Gambar 4.6. Diagram blok gaya redam pada sistem suspensi hidrolik



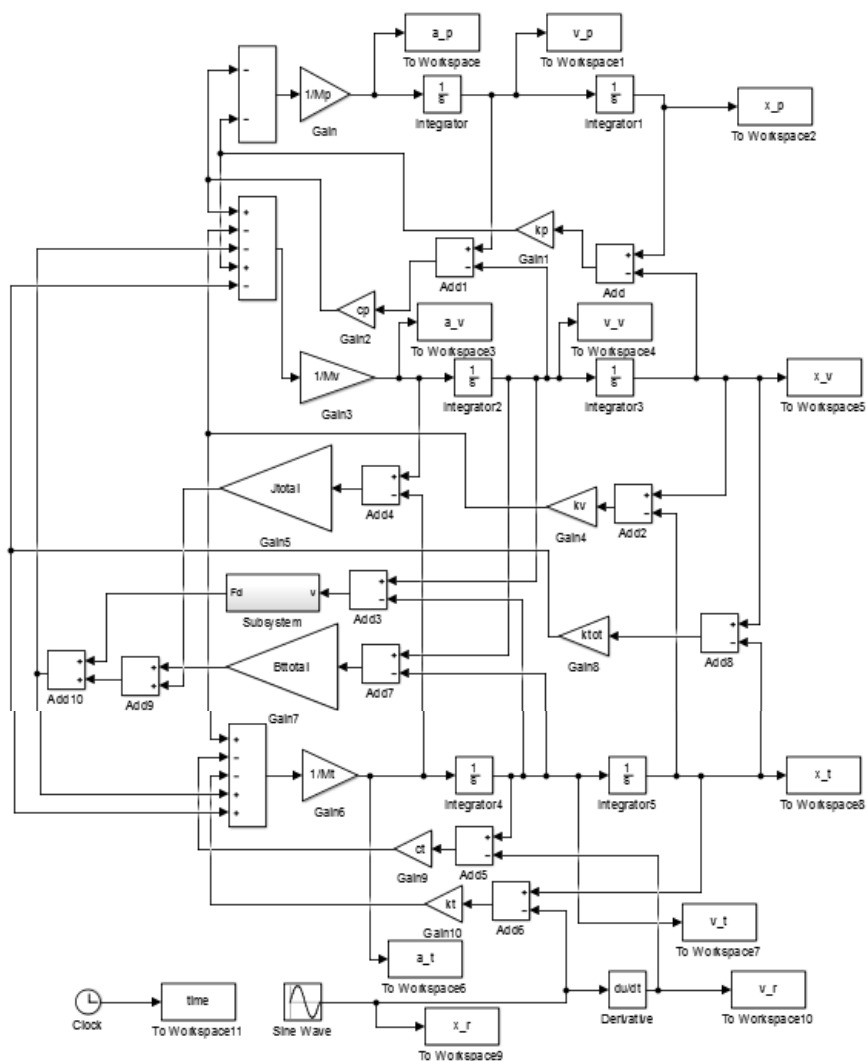
Gambar 4.7. Diagram blok gaya redam pada sistem suspensi modifikasi *single flywheel*

4.3.3. Diagram Blok Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dengan Penggunaan Sistem Suspensi Hidrolik dan Sistem Suspensi Modifikasi *Single Flywheel*

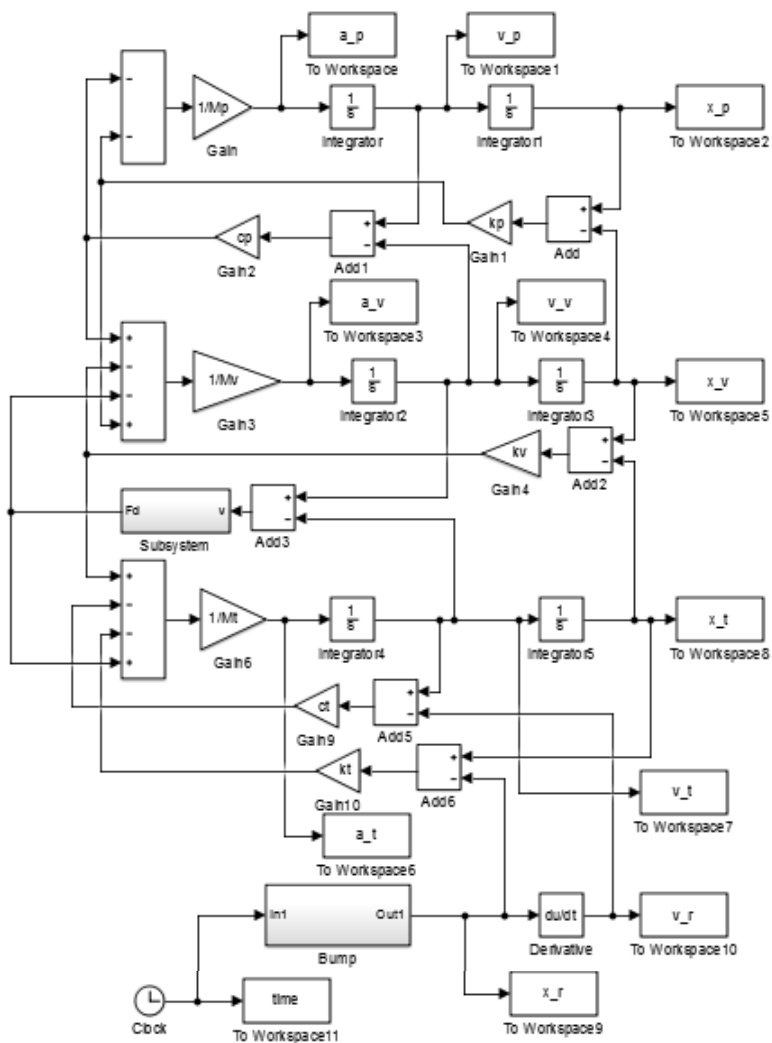
Pada sistem seperempat kendaraan mobil, nilai konstanta redaman pada massa seperempat kendaraan mobil digantikan dengan nilai gaya redaman yang dihasilkan oleh sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi *single flywheel*. *Input* yang digunakan dalam simulasi sistem seperempat kendaraan mobil yaitu *input* sinusoidal dengan kecepatan mobil 20 km/jam, 40 km/jam, 60 km/jam, dan 80 km/jam. Parameter yang digunakan pada sistem seperempat kendaraan mobil ini telah dicantumkan pada tabel 3.3.



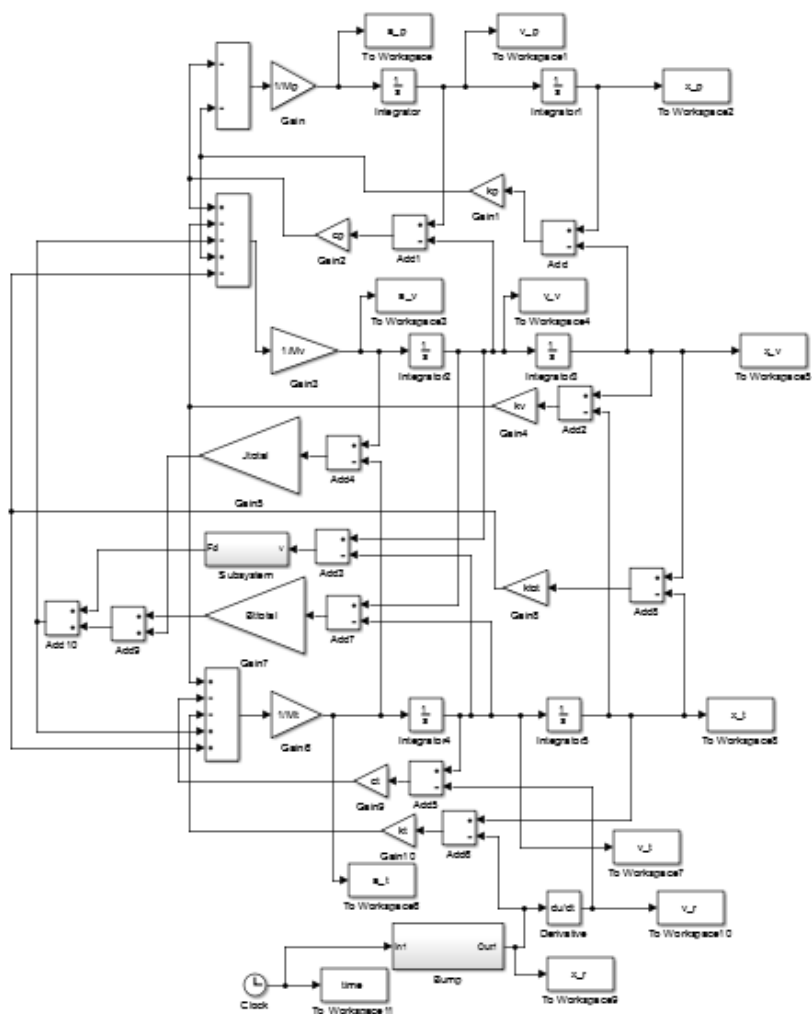
Gambar 4.8. Diagram blok untuk sistem seperempat kendaraan mobil dengan sistem suspensi hidrolik menggunakan *input* sinusoidal



Gambar 4.9. Diagram blok untuk sistem seperempat kendaraan mobil dengan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* menggunakan *input* sinusoidal



Gambar 4.10. Diagram blok untuk sistem seperempat kendaraan mobil dengan sistem suspensi hidrolik menggunakan *input bump modified*



Gambar 4.11. Diagram blok untuk sistem seperempat kendaraan mobil dengan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* menggunakan *input bump modified*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Dalam pemodelan ini didapatkan respon dinamis dari sistem suspensi hidrolik, sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*, sistem seperempat kendaraan dengan penggunaan sistem suspensi hidrolik, serta sistem seperempat kendaraan dengan penggunaan sistem suspensi modifikasi *single flywheel*. Respon dinamis pada sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* yang dibahas pada bab ini adalah respon perpindahan dan kecepatan terhadap gaya redam yang dihasilkan oleh kedua sistem suspensi tersebut. Perlu diketahui bahwa pada grafik respon gaya redam yang dihasilkan, nilai positif merupakan nilai pada kondisi ekspansi, sedangkan nilai negatif merupakan nilai pada kondisi kompresi. Pada sistem seperempat kendaraan, respon dinamis yang dibahas adalah respon perpindahan, kecepatan, dan percepatan yang dialami oleh kendaraan dan penumpang terhadap waktu.

Hal pertama yang dilakukan dalam simulasi untuk sistem suspensi hidrolik adalah pemilihan parameter yang dijaga konstan seperti yang tercantum pada tabel 3.1. Sistem suspensi hidrolik ini digunakan sebagai acuan pembandingan dengan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*. Hal pertama yang dilakukan pada simulasi untuk sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* adalah pemilihan diameter *pinion* (d_p), diameter *flywheel* (d_f), serta tebal *pinion* dan *flywheel* (t) yang dijaga konstan sesuai pada tabel 3.2. Pilihan parameter selanjutnya adalah densitas material *flywheel* sebesar 6800 kg/m^3 , 7480 kg/m^3 , dan 8400 kg/m^3 yang divariasikan. Besar nilai gaya redam sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* disesuaikan dengan besar nilai gaya redam pada sistem suspensi hidrolik yang menjadi acuan.

Pada tahap selanjutnya, sistem suspensi hidrolik dan modifikasi penambahan *single flywheel* diaplikasikan pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan kecepatan kendaraan yang

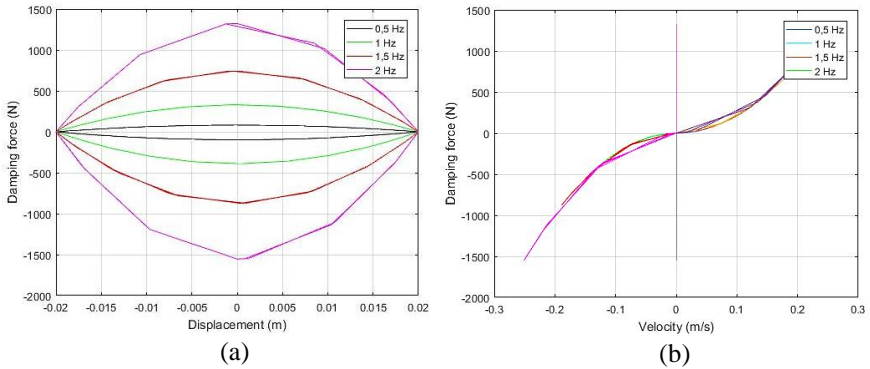
bervariasi. *Input* yang digunakan dalam simulasi yaitu *input* sinusoidal dan *input bump modified*. Dari kedua *input* dan kedua sistem suspensi tersebut didapatkan respon dinamis dari penumpang mobil. Respon dinamis masing-masing sistem suspensi dibandingkan sesuai dengan kriteria kenyamanan berdasarkan percepatan RMS (*Root Mean Square*) menurut ISO 2631.

5.1. Respon Dinamis Sistem Suspensi Hidrolik

Sebelum melakukan simulasi sistem suspensi hidrolik, perlu diketahui parameter dari sistem suspensi tersebut. Parameter dan variasi yang digunakan dalam simulasi sistem suspensi hidrolik tertera pada tabel 5.1.

Tabel 5.1. Parameter dan variasi yang digunakan pada simulasi sistem suspensi hidrolik

Massa jenis minyak (ρ)	Diameter orifice ekspansi (D_e)	Diameter orifice kompresi (D_k)	Diameter piston (D_p)	Diameter piston rod (D_{pr})	Frekuensi
860 kg/m ³	2.8 mm	5 mm	40 mm	30 mm	0.5 Hz
					1 Hz
					1.5 Hz
					2 Hz



Gambar 5.1. Grafik respon perpindahan (a) dan kecepatan (b) terhadap gaya redam pada sistem suspensi hidrolik dengan variasi frekuensi

Gambar 5.1 menunjukkan grafik respon gaya redam terhadap perpindahan (a) dan kecepatan (b) pada sistem suspensi hidrolik dengan variasi frekuensi. Variasi frekuensi yang digunakan yaitu 0.5 Hz, 1 Hz, 1.5 Hz, dan 2 Hz.

Pada grafik respon gaya redam terhadap perpindahan dan kecepatan terlihat bahwa semakin besar frekuensi, maka gaya redam yang dihasilkan semakin besar. Hal ini sesuai dengan teori pada persamaan $f = \frac{v}{\lambda}$, bahwa frekuensi (f) berbanding lurus dengan kecepatan (v), dan kecepatan (\dot{x}) juga berbanding lurus dengan gaya redam (F_d) yaitu teori pada persamaan $F_d = c\dot{x}$. Namun pada grafik respon gaya redam terhadap kecepatan tidak terlihat perbedaannya antara masing-masing frekuensi. Hanya *trend line* pada frekuensi 2 Hz saja yang terlihat, dikarenakan pada frekuensi 0.5 Hz sampai 1.5 Hz memiliki *trend line* yang berhimpit dengan frekuensi 2 Hz, tetapi hanya berbeda pada nilai gaya redam yang dihasilkan. Data nilai gaya redam siklus ekspansi dan kompresi dari sistem suspensi hidrolik terdapat pada tabel 5.2.

Tabel 5.2. Nilai gaya redam siklus ekspansi dan kompresi pada sistem suspensi hidrolik

Frekuensi (Hz)	Gaya Redam (N)	
	Ekspansi	Kompresi
0,5	82,667	97,06
1	330,668	388,335
1,5	744,004	873,537
2	1322,7	1553,3

Dapat diketahui dari tabel 5.2, nilai gaya redam yang dihasilkan dari siklus kompresi lebih besar dibandingkan siklus ekspansi. Pada siklus kompresi, gaya redam yang dihasilkan dipengaruhi oleh besarnya luasan piston (A_p) yang bekerja pada sistem tersebut. Di sisi lain, gaya redam yang dihasilkan pada siklus ekspansi dipengaruhi oleh besarnya selisih antara luasan piston dengan luasan piston *rod* ($A_p - A_{pr}$). Hal ini sesuai dengan persamaan gaya redam masing-masing siklus pada persamaan 4.3 dan 4.4, bahwa gaya redam sebanding dengan luasan kerja area siklus.

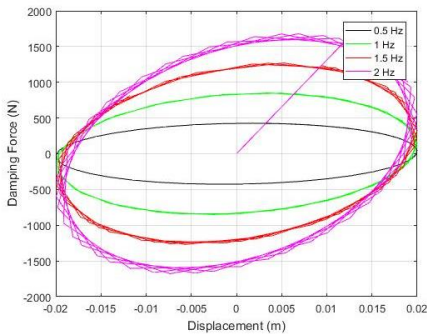
5.2. Respon Dinamis Sistem Suspensi *Single Flywheel*

Pada simulasi sistem suspensi *single flywheel* digunakan parameter dan variasi sesuai tabel 5.3. Variasi yang digunakan dalam simulasi ini yaitu densitas material *flywheel* dan *pinion*, serta frekuensi.

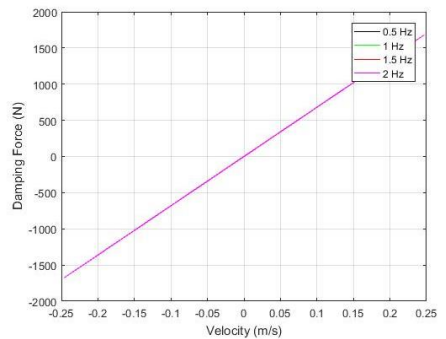
Tabel 5.3. Parameter dan variasi yang digunakan pada simulasi sistem *single flywheel*

Jari-jari pinion (R_p)	Jari-jari flywheel (R_f)	Ketebalan pinion dan flywheel (t)	Koefisien redaman bearing (B_t)	Densitas material (ρ_m)		Frekuensi
30 mm	40 mm	30 mm	27	Cast iron	6800 kg/m ³	0.5 Hz
						1 Hz
						1.5 Hz
						2 Hz
				Stainless steel	7480 kg/m ³	0.5 Hz
						1 Hz
						1.5 Hz
						2 Hz
				Brass-casting	8400 kg/m ³	0.5 Hz
						1 Hz
						1.5 Hz
						2 Hz

Cast Iron ($\rho_m = 6800 \text{ kg/m}^3$)

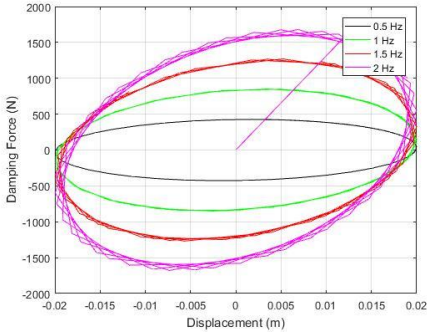


(a)

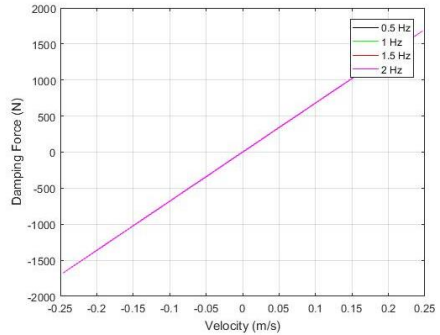


(b)

Stainless Steel ($\rho_m = 7480 \text{ kg/m}^3$)

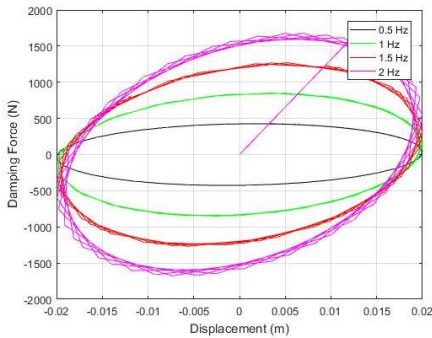


(c)

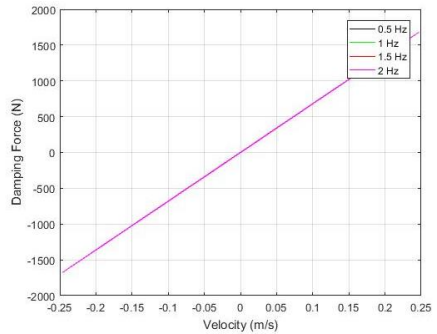


(d)

Brass Casting ($\rho_m = 8400 \text{ kg/m}^3$)



(e)



(f)

Gambar 5.2. Grafik respon perpindahan dan kecepatan terhadap gaya redam pada sistem suspensi *single flywheel* dengan variasi densitas material *pinion* dan *flywheel*, serta frekuensi

Gambar 5.2 merupakan grafik respon gaya redam terhadap perpindahan (a – c – e) dan kecepatan (b – d – f) dengan variasi densitas material *pinion* dan *flywheel*, serta frekuensi.

Pada grafik respon gaya redam terhadap perpindahan terlihat bahwa semakin besar frekuensi, maka gaya redam yang dihasilkan juga semakin besar. Hal ini sesuai dengan teori bahwa frekuensi berbanding lurus dengan kecepatan, dan kecepatan juga berbanding lurus dengan gaya redam yang dihasilkan.

Karakteristik dari grafik respon gaya redam terhadap perpindahan dan respon gaya redam terhadap kecepatan pada sistem suspensi *single flywheel* memiliki bentuk yang berbeda dengan sistem suspensi hidrolik. Hal ini disebabkan oleh perbedaan persamaan gaya redam di antara kedua sistem suspensi tersebut. Pada sistem suspensi *single flywheel*, grafik gaya redam terhadap kecepatan yang dihasilkan membentuk garis linier dengan *trend line* yang cenderung meningkat. Pada frekuensi 0.5 Hz sampai 1.5 Hz memiliki nilai kecepatan yang berhimpit dengan frekuensi 2 Hz, sehingga garis yang terlihat hanya pada frekuensi 2 Hz saja. Data nilai gaya redam siklus ekspansi dan kompresi dari sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* terdapat pada tabel 5.4.

Tabel 5.4. Nilai gaya redam siklus ekspansi dan kompresi pada sistem suspensi *single flywheel*

Material	Densitas (kg/m ³)	Frekuensi (Hz)	Gaya Redam (N)	
			Ekspansi	Kompresi
Cast iron	6800	0,5	427,136	426,725
		1	851,46	850,96
		1,5	1270,2	1269,1
		2	1680,5	1678,8
Stainless Steel	7480	0,5	427,138	426,725
		1	851,47	850,97
		1,5	1270,2	1269,2
		2	1680,6	1678,9

<i>Brass Casting</i>	8400	0,5	427,151	426,726
		1	851,49	850,99
		1,5	1270,3	1269,2
		2	1680,7	1679

Dapat diketahui dari tabel 5.4 bahwa nilai gaya redam siklus ekspansi dan kompresi dari sistem suspensi *single flywheel* tidak jauh berbeda. Hal ini disebabkan oleh tidak adanya perbedaan variabel pada siklus ekspansi dan kompresi dari sistem suspensi *single flywheel*. Pada sistem suspensi *single flywheel*, siklus ekspansi dan kompresi berada dalam satu persamaan. Selain itu, pada variasi densitas material dari kedua siklus tersebut juga tidak didapatkan perbedaan nilai gaya redam yang signifikan karena kecilnya pengaruh densitas terhadap nilai gaya redam yang dihasilkan.

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, material *brass casting* pada sistem suspensi *single flywheel* dipilih karena memiliki nilai gaya redam yang paling besar dibandingkan material lainnya. Selanjutnya, sistem suspensi *single flywheel* tersebut akan dimodifikasi dengan sistem suspensi hidrolik menggunakan susunan tertentu.

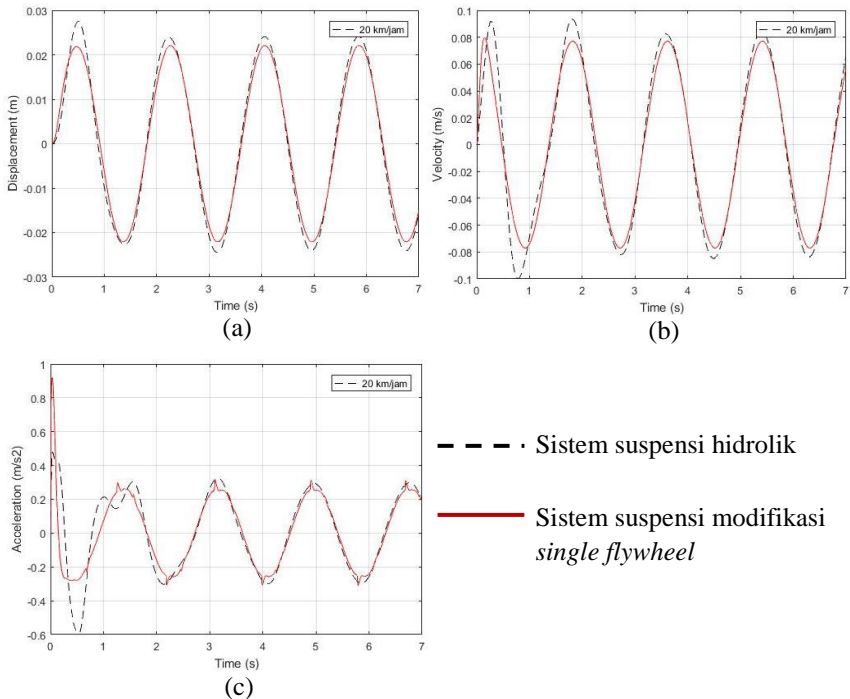
5.3. Perbandingan Respon Dinamis Kendaraan dari Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dengan Sistem Suspensi Hidrolik dan Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan *Single Flywheel*

Setelah dilakukan simulasi pada sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi *single flywheel*, sistem suspensi tersebut diaplikasikan pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan *input* sinusoidal dan *input bump modified*. *Input* sinusoidal digunakan untuk melihat respon dinamis sistem seperempat kendaraan akibat beban harmonik, sedangkan *input bump modified* digunakan untuk melihat respon *transient* sistem seperempat kendaraan akibat beban *impact*. Pada simulasi seperempat

kendaraan ini digunakan variasi kecepatan kendaraan, yaitu sebesar 20 km/jam, 40 km/jam, 60 km/jam, dan 80 km/jam.

5.3.1. Input Sinusoidal

• Kecepatan 20 km/jam



Gambar 5.3. Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 20$ km/jam)

Gambar 5.3 merupakan grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan kendaraan terhadap waktu pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single*

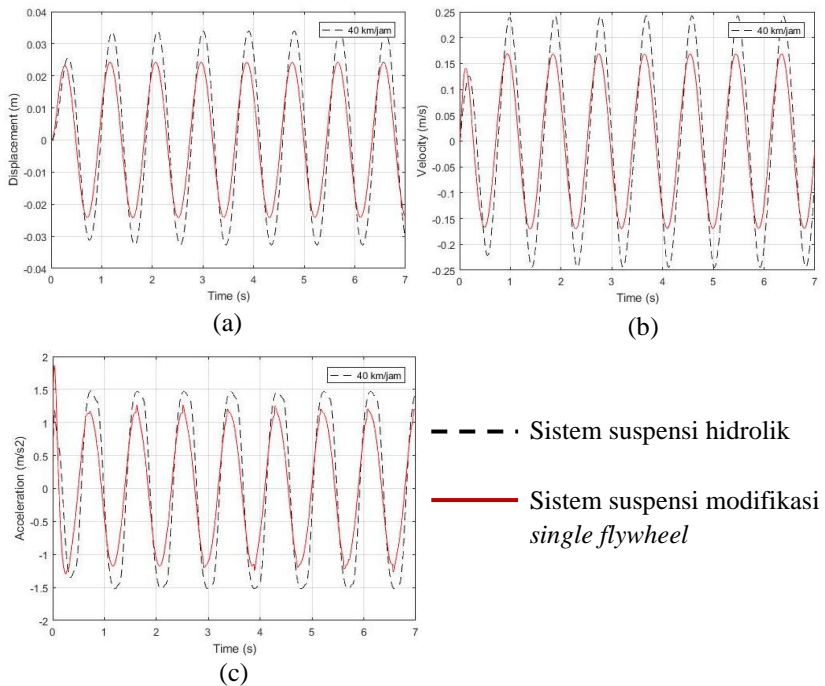
flywheel pada kecepatan 20 km/jam menggunakan *input* sinusoidal. Dari ketiga grafik tersebut dapat diketahui bahwa respon dari grafik merupakan respon *steady state*. Respon yang didapat dari sistem suspensi hidrolik mencapai kondisi *steady state* sebelum 3 detik, sedangkan untuk sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* mencapai kondisi *steady state* sebelum 2 detik.

Pada grafik hasil simulasi sistem suspensi hidrolik didapatkan nilai perpindahan maksimum sebesar 0.028 m, kecepatan maksimum 0.094 m/s, dan percepatan maksimum 0.477 m/s². Sedangkan pada sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*, didapatkan nilai perpindahan maksimum sebesar 0.022 m, kecepatan maksimum 0.079 m/s, dan percepatan maksimum 0.92 m/s². Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa pada kecepatan 20 km/jam, sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* memiliki respon kendaraan yang lebih baik dari sistem suspensi hidrolik dikarenakan memiliki nilai perpindahan yang lebih kecil. Data nilai respon dinamis hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* terdapat pada tabel 5.5.

Tabel 5.5. Nilai respon dinamis hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* ($v = 20$ km/jam) menggunakan *input* sinusoidal

Jenis Suspensi	Perpindahan Maksimum (m)	Kecepatan Maksimum (m/s)	Percepatan Maksimum (m/s ²)	<i>Settling Time</i> (s)
Hidrolik	0,028	0,094	0,477	3
Modifikasi	0,022	0,079	0,92	2

- **Kecepatan 40 km/jam**



Gambar 5.4. Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan *input* sinusoidal ($v = 40$ km/jam)

Gambar 5.4 merupakan grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan kendaraan terhadap waktu pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* pada kecepatan 40 km/jam menggunakan *input* sinusoidal. Dari ketiga grafik tersebut dapat diketahui bahwa respon dari grafik merupakan respon *steady state*. Respon yang didapat dari sistem suspensi hidrolik mencapai kondisi *steady state* sebelum 1 detik, sedangkan untuk sistem suspensi modifikasi

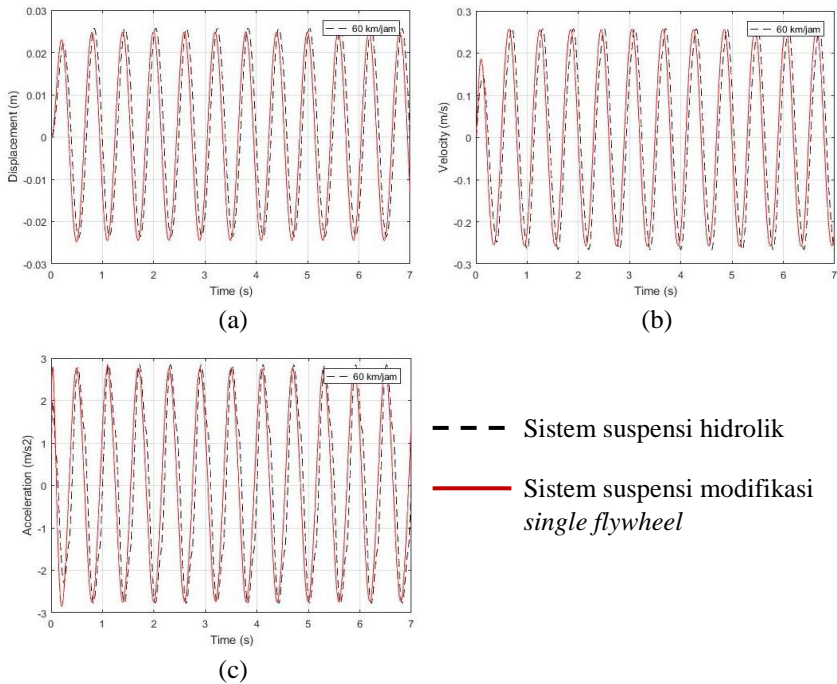
penambahan *single flywheel* mencapai kondisi *steady state* sebelum 1.5 detik.

Pada grafik hasil simulasi sistem suspensi hidrolik didapatkan nilai perpindahan maksimum sebesar 0.034 m, kecepatan maksimum 0.242 m/s, dan percepatan maksimum 1.476 m/s². Sedangkan pada sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*, didapatkan nilai perpindahan maksimum sebesar 0.024 m, kecepatan maksimum 0.169 m/s, dan percepatan maksimum 1.859 m/s². Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa pada kecepatan 40 km/jam, sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* memiliki respon kendaraan yang lebih baik dari sistem suspensi hidrolik dikarenakan memiliki nilai perpindahan yang lebih kecil. Data nilai respon dinamis hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* terdapat pada tabel 5.6.

Tabel 5.6. Nilai respon dinamis hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* ($v = 40$ km/jam) menggunakan *input* sinusoidal

Jenis Suspensi	Perpindahan Maksimum (m)	Kecepatan Maksimum (m/s)	Percepatan Maksimum (m/s ²)	<i>Settling Time</i> (s)
Hidrolik	0,034	0,242	1,476	1
Modifikasi	0,024	0,169	1,859	1,5

- **Kecepatan 60 km/jam**



Gambar 5.5. Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan *input* sinusoidal ($v = 60 \text{ km/jam}$)

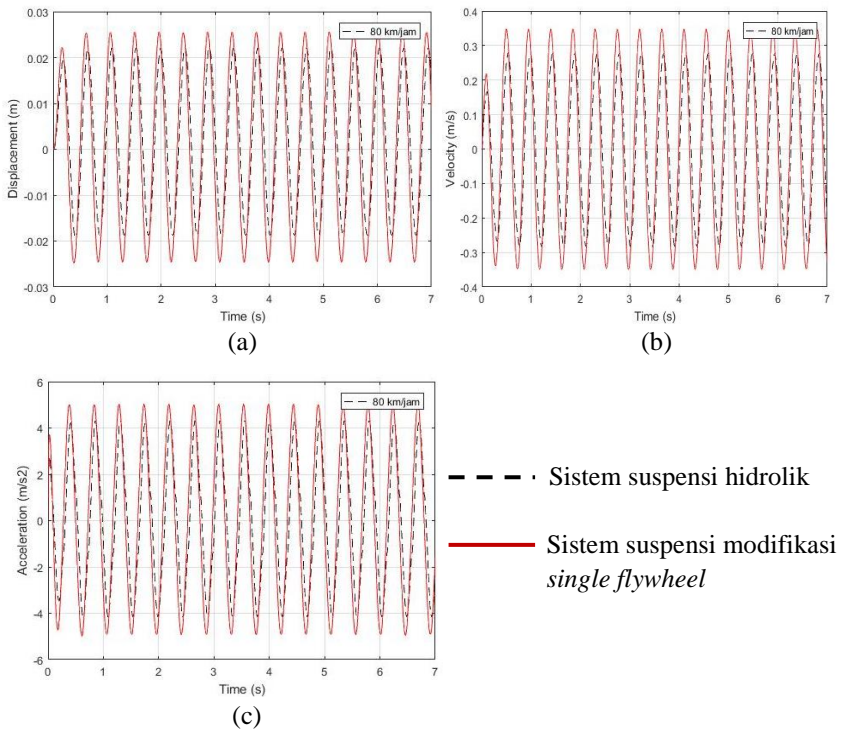
Gambar 5.5 merupakan grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan kendaraan terhadap waktu pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* pada kecepatan 60 km/jam menggunakan *input* sinusoidal. Dari ketiga grafik tersebut dapat diketahui bahwa respon dari grafik merupakan respon *steady state*. Respon yang didapat dari kedua sistem suspensi tersebut mencapai kondisi *steady state* sebelum 1 detik.

Pada grafik hasil simulasi sistem suspensi hidrolik didapatkan nilai perpindahan maksimum sebesar 0.026 m, kecepatan maksimum 0.259 m/s, dan percepatan maksimum 2.845 m/s². Sedangkan pada sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*, didapatkan nilai perpindahan maksimum sebesar 0.025 m, kecepatan maksimum 0.257 m/s, dan percepatan maksimum 2.846 m/s². Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa pada kecepatan 60 km/jam, nilai respon kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik tidak jauh berbeda dengan nilai respon kendaraan yang menggunakan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*. Data nilai respon dinamis hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* terdapat pada tabel 5.7.

Tabel 5.7. Nilai respon dinamis hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* ($v = 60$ km/jam) menggunakan *input* sinusoidal

Jenis Suspensi	Perpindahan Maksimum (m)	Kecepatan Maksimum (m/s)	Percepatan Maksimum (m/s ²)	Settling Time (s)
Hidrolik	0,026	0,259	2,845	1
Modifikasi	0,025	0,257	2,846	1

- Kecepatan 80 km/jam



Gambar 5.6. Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan *input* sinusoidal ($v = 80$ km/jam)

Gambar 5.6 merupakan grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan kendaraan terhadap waktu pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* pada kecepatan 80 km/jam menggunakan *input* sinusoidal. Dari ketiga grafik tersebut dapat diketahui bahwa respon dari grafik merupakan respon *steady state*. Respon yang

didapat dari kedua sistem suspensi tersebut mencapai kondisi *steady state* sebelum 0.5 detik.

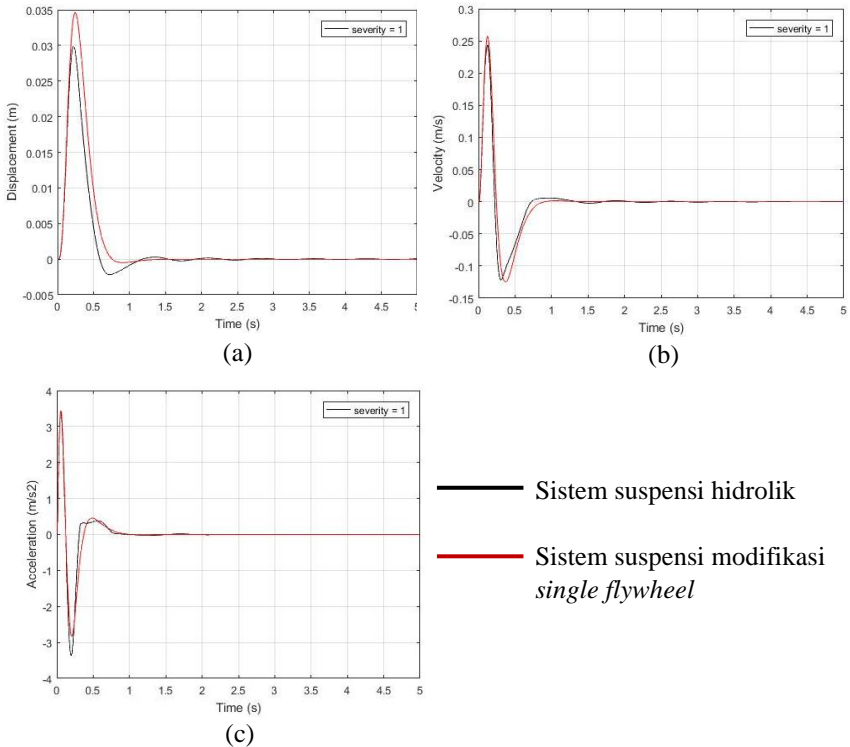
Pada grafik hasil simulasi sistem suspensi hidrolik didapatkan nilai perpindahan maksimum sebesar 0.022 m, kecepatan maksimum 0.278 m/s, dan percepatan maksimum 4.316 m/s². Sedangkan pada sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*, didapatkan nilai perpindahan maksimum sebesar 0.026 m, kecepatan maksimum 0.348 m/s, dan percepatan maksimum 5.026 m/s². Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa pada kecepatan 80 km/jam, respon kendaraan menggunakan sistem suspensi hidrolik lebih baik dari kendaraan dengan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* dikarenakan memiliki nilai perpindahan yang lebih kecil. Data nilai respon dinamis hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* terdapat pada tabel 5.8.

Tabel 5.8. Nilai respon dinamis hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* ($v = 80$ km/jam) menggunakan *input* sinusoidal

Jenis Suspensi	Perpindahan Maksimum (m)	Kecepatan Maksimum (m/s)	Percepatan Maksimum (m/s ²)	<i>Settling Time</i> (s)
Hidrolik	0,022	0,278	4,316	0,5
Modifikasi	0,026	0,348	5,026	0,5

5.3.2. Input Bump Modified

- **Severity Parameter = 1**



Gambar 5.7. Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan *input bump modified* ($\gamma = 1$)

Gambar 5.7 merupakan grafik respon dinamis sistem seperempat kendaraan mobil berupa perpindahan (a), kecepatan (b), dan percepatan (c) terhadap waktu dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single*

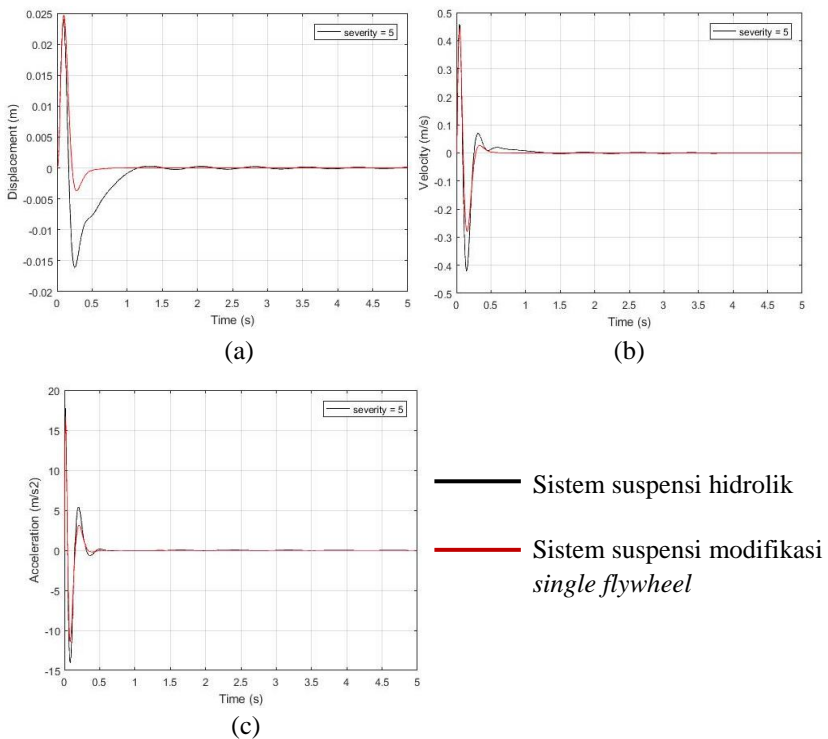
flywheel menggunakan *input bump modified* ($\gamma = 1$). Dari ketiga grafik tersebut respon *transient* yang didapat hampir sama, yaitu mencapai kondisi *steady state* sebelum 1 detik.

Pada grafik hasil simulasi sistem suspensi hidrolik didapatkan nilai perpindahan maksimum sebesar 0.029 m, kecepatan maksimum 0.243 m/s, dan percepatan maksimum 3.402 m/s². Sedangkan pada sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*, didapatkan nilai perpindahan maksimum sebesar 0.034 m, kecepatan maksimum 0.257 m/s, dan percepatan maksimum 3.444 m/s². Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa pada $\gamma = 1$, respon kendaraan apabila dikenai beban *impact* menggunakan sistem suspensi hidrolik lebih baik dari kendaraan dengan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* dikarenakan memiliki nilai perpindahan yang lebih kecil. Data nilai respon dinamis hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* terdapat pada tabel 5.9.

Tabel 5.9. Nilai respon dinamis hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* ($\gamma = 1$) menggunakan *input bump modified*

Jenis Suspensi	Perpindahan Maksimum (m)	Kecepatan Maksimum (m/s)	Percepatan Maksimum (m/s ²)	Settling Time (s)
Hidrolik	0,029	0,243	3,402	1
Modifikasi	0,034	0,257	3,444	1

• **Severity Parameter = 5**



Gambar 5.8. Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan *input bump modified* ($\gamma = 5$)

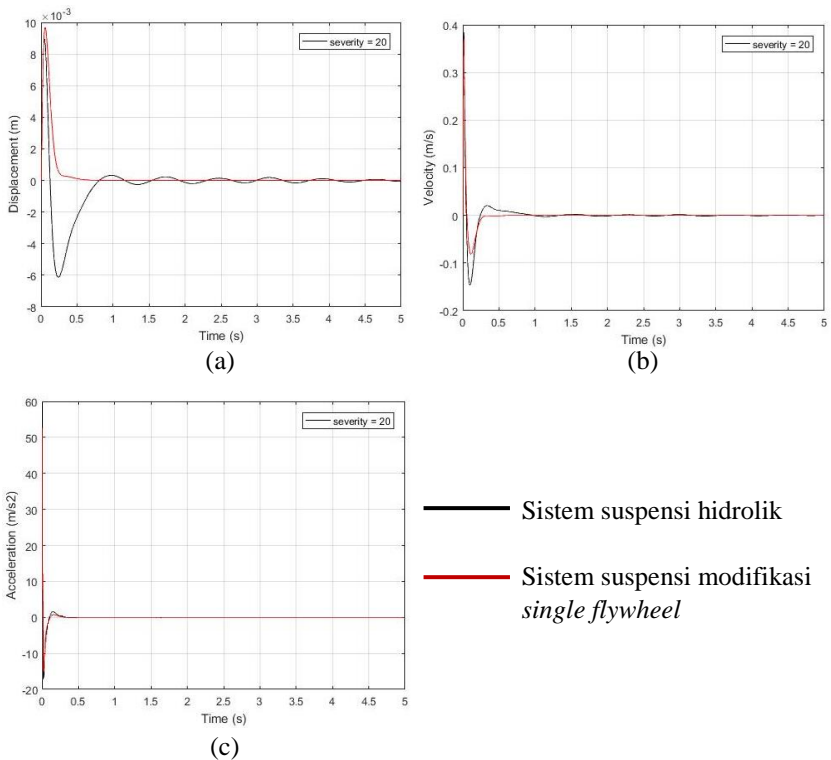
Gambar 5.8 merupakan grafik respon dinamis sistem seperempat kendaraan mobil berupa perpindahan (a), kecepatan (b), dan percepatan (c) terhadap waktu dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* menggunakan *input bump modified* ($\gamma = 5$). Dari ketiga grafik tersebut dapat diketahui bahwa respon dari grafik merupakan respon *transient*. Respon yang didapat dari sistem suspensi hidrolik mencapai kondisi *steady state* sebelum 1,5 detik,

sedangkan untuk sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* mencapai kondisi *steady state* sebelum 1 detik. Pada grafik hasil simulasi sistem suspensi hidrolik didapatkan nilai perpindahan maksimum sebesar 0.024 m, kecepatan maksimum 0.458 m/s, dan percepatan maksimum 17.725 m/s². Sedangkan pada sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*, didapatkan nilai perpindahan maksimum sebesar 0.025 m, kecepatan maksimum 0.443 m/s, dan percepatan maksimum 16.699 m/s². Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa pada $\gamma = 5$, respon kendaraan apabila dikenai beban *impact* menggunakan sistem suspensi hidrolik lebih baik dari kendaraan dengan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* dikarenakan memiliki nilai perpindahan yang lebih kecil. Data nilai respon dinamis hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* terdapat pada tabel 5.10.

Tabel 5.10. Nilai respon dinamis hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* ($\gamma = 5$) menggunakan *input bump modified*

Jenis Suspensi	Perpindahan Maksimum (m)	Kecepatan Maksimum (m/s)	Percepatan Maksimum (m/s ²)	Settling Time (s)
Hidrolik	0,024	0,458	17,725	1,5
Modifikasi	0,025	0,443	16,699	1

- **Severity Parameter = 20**



Gambar 5.9. Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan *input bump modified* ($\gamma = 20$)

Gambar 5.9 merupakan grafik respon dinamis sistem seperempat kendaraan mobil berupa perpindahan (a), kecepatan (b), dan percepatan (c) terhadap waktu dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* menggunakan *input bump modified* ($\gamma = 20$). Dari ketiga grafik tersebut dapat diketahui bahwa respon dari grafik

merupakan respon *transient*. Respon yang didapat dari sistem suspensi hidrolik mencapai kondisi *steady state* sebelum 1,5 detik, sedangkan untuk sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* mencapai kondisi *steady state* sebelum 1 detik. Pada grafik hasil simulasi sistem suspensi hidrolik didapatkan nilai perpindahan maksimum sebesar 0.009 m, kecepatan maksimum 0.384 m/s, dan percepatan maksimum 59.625 m/s². Sedangkan pada sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*, didapatkan nilai perpindahan maksimum sebesar 0.01 m, kecepatan maksimum 0.369 m/s, dan percepatan maksimum 52.342 m/s². Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa pada $\gamma = 20$, respon kendaraan apabila dikenai beban *impact* menggunakan sistem suspensi hidrolik lebih baik dari kendaraan dengan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* dikarenakan memiliki nilai perpindahan yang lebih kecil. Data nilai respon dinamis hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* terdapat pada tabel 5.11.

Tabel 5.11. Nilai respon dinamis hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* ($\gamma = 20$) menggunakan *input bump modified*

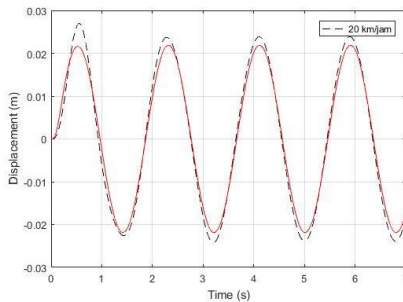
Jenis Suspensi	Perpindahan Maksimum (m)	Kecepatan Maksimum (m/s)	Percepatan Maksimum (m/s ²)	Settling Time (s)
Hidrolik	0,009	0,384	59,625	1,5
Modifikasi	0,01	0,369	52,342	1

5.4. Perbandingan Respon Dinamis Penumpang pada Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dengan Sistem Suspensi Hidrolik dan Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan *Single Flywheel*

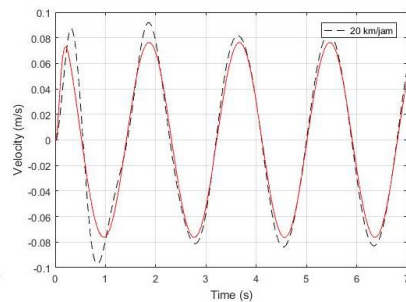
Selain dilakukan simulasi untuk mengetahui respon dinamis kendaraan pada sistem seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*, juga dilakukan simulasi untuk mengetahui respon penumpang menggunakan *input* sinusoidal dan *input bump modified*. *Input* sinusoidal digunakan untuk melihat respon dinamis sistem seperempat kendaraan akibat beban harmonik, sedangkan *input bump modified* digunakan untuk melihat respon *transient* sistem seperempat kendaraan akibat beban *impact*. Variasi yang digunakan dalam simulasi ini yaitu variasi kecepatan kendaraan di antaranya 20 km/jam, 40 km/jam, 60 km/jam, dan 80 km/jam.

5.4.1. *Input* Sinusoidal

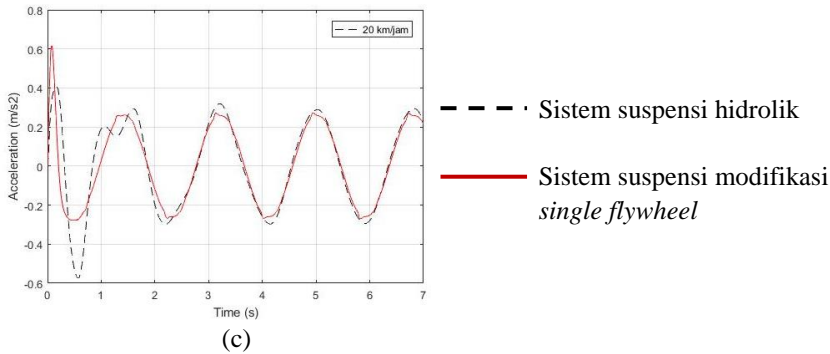
- Kecepatan 20 km/jam



(a)



(b)



Gambar 5.10. Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan *input* sinusoidal ($v = 20$ km/jam)

Gambar 5.10 merupakan grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan penumpang terhadap waktu pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* menggunakan *input* sinusoidal pada kecepatan 20 km/jam. Dari ketiga grafik tersebut dapat diketahui bahwa respon dari grafik merupakan respon *steady state*. Respon yang didapat dari sistem suspensi hidrolik mencapai kondisi *steady state* sebelum 4 detik, sedangkan untuk sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* mencapai kondisi *steady state* sebelum 2 detik.

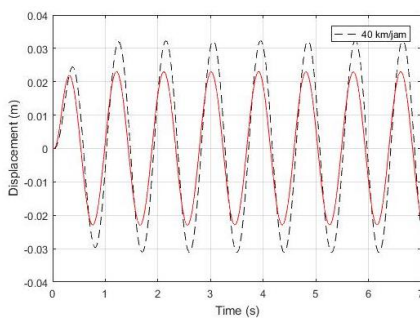
Pada grafik hasil simulasi sistem suspensi hidrolik didapatkan nilai perpindahan maksimum sebesar 0.027 m, kecepatan maksimum 0.092 m/s, dan percepatan maksimum 0,408 m/s^2 . Sedangkan pada sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*, didapatkan nilai perpindahan maksimum sebesar 0.022 m, kecepatan maksimum 0.076 m/s, dan percepatan maksimum 0.617 m/s^2 . Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa pada kecepatan 20 km/jam, respon penumpang kendaraan menggunakan sistem suspensi modifikasi penambahan *single*

flywheel lebih baik dari kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dikarenakan memiliki nilai perpindahan yang lebih kecil. Data nilai respon dinamis penumpang hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* terdapat pada tabel 5.12.

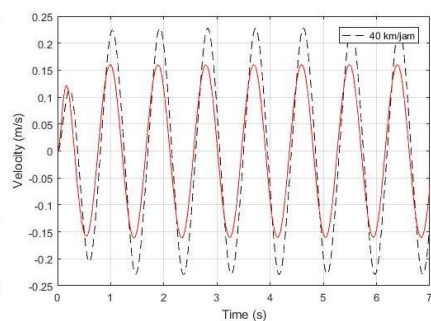
Tabel 5.12. Nilai respon dinamis penumpang hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* ($v = 20 \text{ km/jam}$)

Jenis Suspensi	Perpindahan Maksimum (m)	Kecepatan Maksimum (m/s)	Percepatan Maksimum (m/s^2)	Settling Time (s)
Hidrolik	0,027	0,092	0,408	4
Modifikasi	0,022	0,076	0,617	2

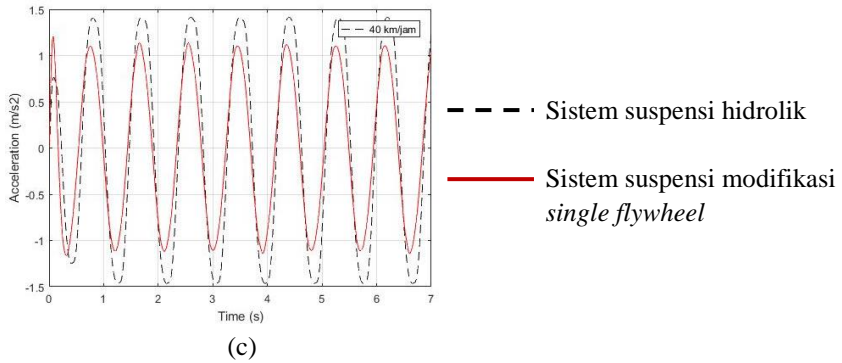
- **Kecepatan 40 km /jam**



(a)



(b)



Gambar 5.11. Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan *input* sinusoidal ($v = 40 \text{ km/jam}$)

Gambar 5.11 merupakan grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan penumpang terhadap waktu pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* menggunakan *input* sinusoidal pada kecepatan 40 km/jam. Dari ketiga grafik tersebut dapat diketahui bahwa respon dari grafik merupakan respon *steady state*. Respon yang didapat dari kedua sistem suspensi tersebut mencapai kondisi *steady state* sebelum 1 detik.

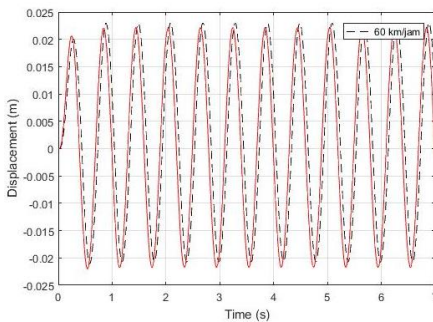
Pada grafik hasil simulasi sistem suspensi hidrolik didapatkan nilai perpindahan maksimum sebesar 0.032 m, kecepatan maksimum 0.228 m/s, dan percepatan maksimum 1,417 m/s^2 . Sedangkan pada sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*, didapatkan nilai perpindahan maksimum sebesar 0.023 m, kecepatan maksimum 0.16 m/s, dan percepatan maksimum 1.204 m/s^2 . Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa pada kecepatan 40 km/jam, respon penumpang kendaraan menggunakan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* lebih baik dari kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik

dikarenakan memiliki nilai perpindahan yang lebih kecil. Data nilai respon dinamis penumpang hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* terdapat pada tabel 5.13.

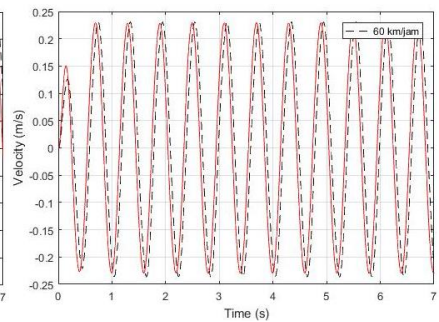
Tabel 5.13. Nilai respon dinamis penumpang hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* ($v = 40 \text{ km/jam}$)

Jenis Suspensi	Perpindahan Maksimum (m)	Kecepatan Maksimum (m/s)	Percepatan Maksimum (m/s^2)	Settling Time (s)
Hidrolik	0,032	0,228	1,417	1
Modifikasi	0,023	0,16	1,204	1

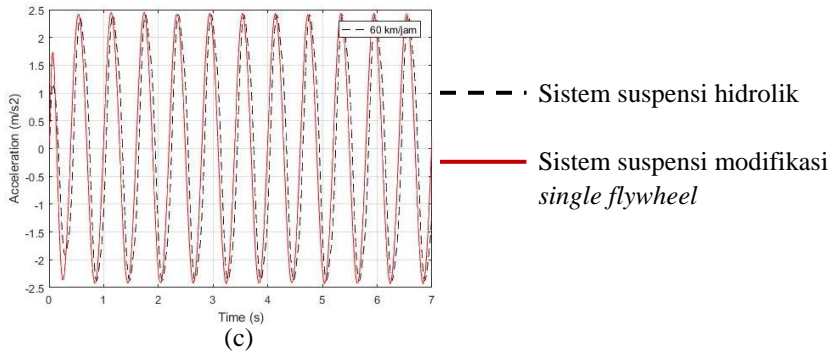
- **Kecepatan 60 km/jam**



(a)



(b)



Gambar 5.12. Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan *input* sinusoidal ($v = 60$ km/jam)

Gambar 5.12 merupakan grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan penumpang terhadap waktu pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* menggunakan *input* sinusoidal pada kecepatan 60 km/jam. Dari ketiga grafik tersebut dapat diketahui bahwa respon dari grafik merupakan respon *steady state*. Respon yang didapat dari kedua sistem suspensi tersebut mencapai kondisi *steady state* sebelum 0.5 detik.

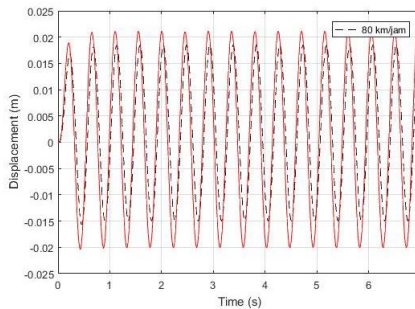
Pada grafik hasil simulasi sistem suspensi hidrolik didapatkan nilai perpindahan maksimum sebesar 0.023 m, kecepatan maksimum 0.232 m/s, dan percepatan maksimum 2.406 m/s². Sedangkan pada sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*, didapatkan nilai perpindahan maksimum sebesar 0.022 m, kecepatan maksimum 0.229 m/s, dan percepatan maksimum 2.449 m/s². Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa pada kecepatan 60 km/jam, nilai respon penumpang kendaraan menggunakan sistem suspensi hidrolik tidak jauh berbeda dengan nilai respon penumpang kendaraan yang menggunakan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*. Data nilai respon

dinamis penumpang hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* terdapat pada tabel 5.14.

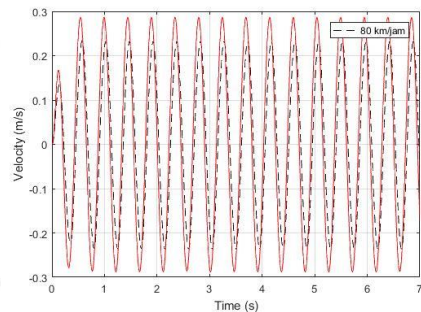
Tabel 5.14. Nilai respon dinamis penumpang hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* ($v = 60 \text{ km/jam}$)

Jenis Suspensi	Perpindahan Maksimum (m)	Kecepatan Maksimum (m/s)	Percepatan Maksimum (m/s^2)	Settling Time (s)
Hidrolik	0,023	0,232	2,406	0,5
Modifikasi	0,022	0,229	2,449	0,5

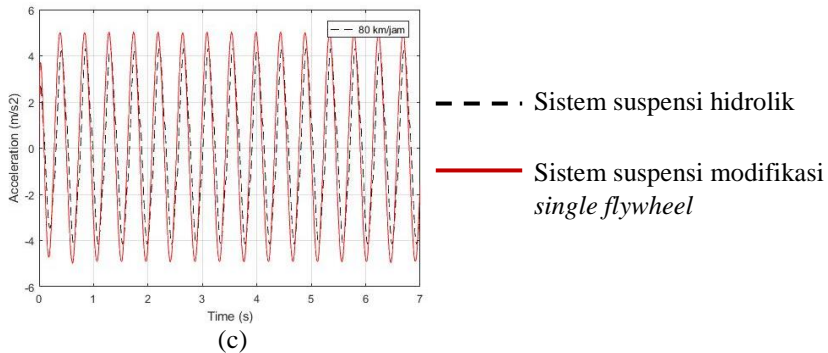
• **Kecepatan 80 km/jam**



(a)



(b)



Gambar 5.13. Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan *input* sinusoidal ($v = 80$ km/jam)

Gambar 5.13 merupakan grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan penumpang terhadap waktu pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* menggunakan *input* sinusoidal pada kecepatan 80 km/jam. Dari ketiga grafik tersebut dapat diketahui bahwa respon dari grafik merupakan respon *steady state*. Respon yang didapat dari kedua sistem suspensi tersebut mencapai kondisi *steady state* sebelum 0.5 detik.

Pada grafik hasil simulasi sistem suspensi hidrolik didapatkan nilai perpindahan maksimum sebesar 0.019 m, kecepatan maksimum 0.234 m/s, dan percepatan maksimum 3.359 m/s². Sedangkan pada sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*, didapatkan nilai perpindahan maksimum sebesar 0.021 m, kecepatan maksimum 0.287 m/s, dan percepatan maksimum 4.076 m/s². Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa pada kecepatan 80 km/jam, respon penumpang kendaraan yang menggunakan sistem suspensi hidrolik lebih baik dari kendaraan dengan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* dikarenakan memiliki nilai perpindahan yang lebih kecil. Data nilai

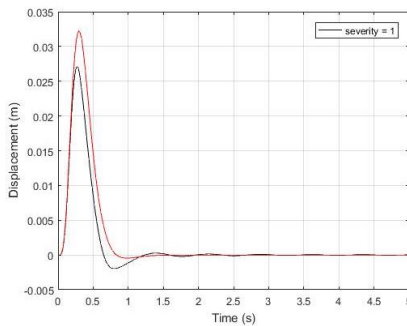
respon dinamis penumpang hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* terdapat pada tabel 5.15.

Tabel 5.15. Nilai respon dinamis penumpang hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* ($v = 80$ km/jam)

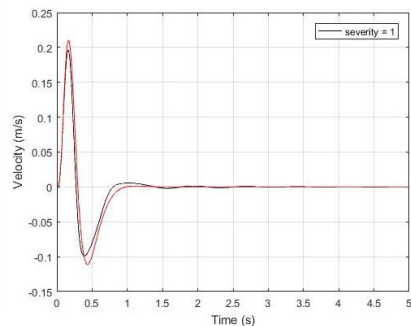
Jenis Suspensi	Perpindahan Maksimum (m)	Kecepatan Maksimum (m/s)	Percepatan Maksimum (m/s^2)	Settling Time (s)
Hidrolik	0,019	0,234	3,359	0,5
Modifikasi	0,021	0,287	4,076	0,5

5.4.2. Input Bump Modified

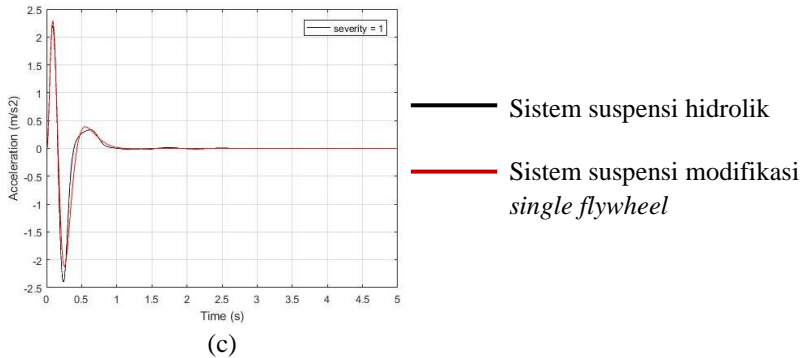
- *Severity Parameter = 1*



(a)



(b)



Gambar 5.14. Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan *input bump modified* ($\gamma = 1$)

Gambar 5.14 merupakan grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan penumpang terhadap waktu pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* menggunakan *input bump modified* ($\gamma = 1$). Dari ketiga grafik tersebut dapat diketahui bahwa respon dari grafik merupakan respon *transient*. Respon yang didapat dari kedua sistem suspensi tersebut mencapai kondisi *steady state* sebelum 1 detik.

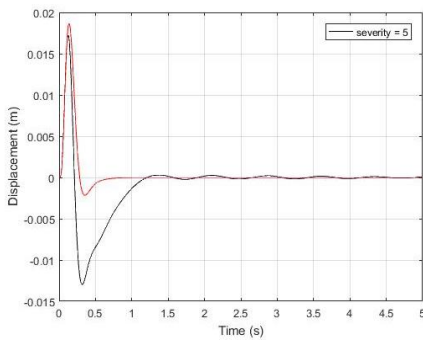
Pada grafik hasil simulasi sistem suspensi hidrolik didapatkan nilai perpindahan maksimum sebesar 0.027 m, kecepatan maksimum 0.196 m/s, dan percepatan maksimum 2.209 m/s². Sedangkan pada sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*, didapatkan nilai perpindahan maksimum sebesar 0.032 m, kecepatan maksimum 0.21 m/s, dan percepatan maksimum 2.289 m/s². Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa pada $\gamma = 1$, respon penumpang kendaraan apabila dikenai beban *impact* yang menggunakan sistem suspensi hidrolik lebih baik dari kendaraan dengan sistem suspensi modifikasi penambahan *single*

flywheel dikarenakan memiliki nilai perpindahan yang lebih kecil. Data nilai respon dinamis penumpang hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* terdapat pada tabel 5.16.

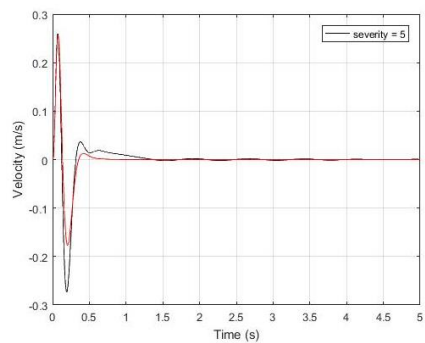
Tabel 5.16. Nilai respon dinamis penumpang hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* ($\gamma = 1$) menggunakan *input bump modified*

Jenis Suspensi	Perpindahan Maksimum (m)	Kecepatan Maksimum (m/s)	Percepatan Maksimum (m/s ²)	Settling Time (s)
Hidrolik	0,027	0,196	2,209	1
Modifikasi	0,032	0,21	2,289	1

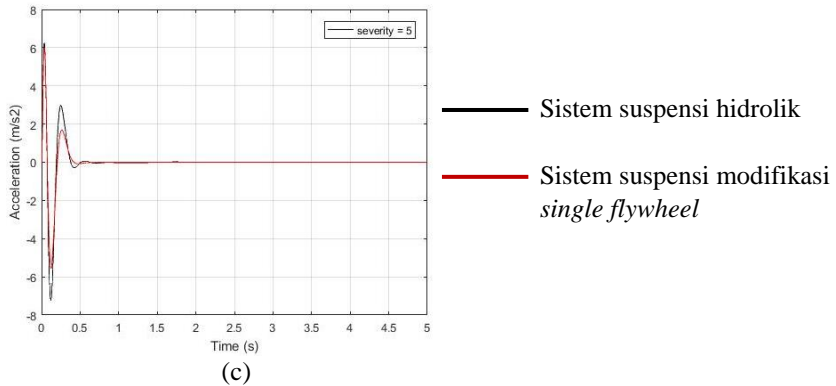
- **Severity Parameter = 5**



(a)



(b)



Gambar 5.15. Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan *input bump modified* ($\gamma = 5$)

Gambar 5.15 merupakan grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan penumpang terhadap waktu pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* menggunakan *input bump modified* ($\gamma = 5$). Dari ketiga grafik tersebut dapat diketahui bahwa respon dari grafik merupakan respon *transient*. Respon yang didapat dari sistem suspensi hidrolik mencapai kondisi *steady state* sebelum 1.5 detik, sedangkan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* mencapai kondisi *steady state* sebelum 1 detik.

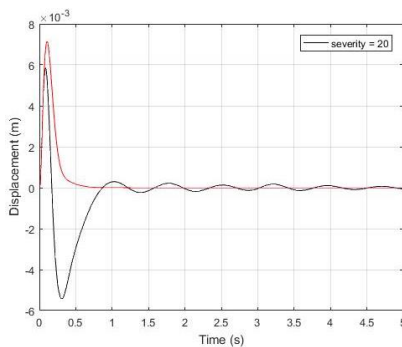
Pada grafik hasil simulasi sistem suspensi hidrolik didapatkan nilai perpindahan maksimum sebesar 0.017 m, kecepatan maksimum 0.259 m/s, dan percepatan maksimum 6.258 m/s^2 . Sedangkan pada sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*, didapatkan nilai perpindahan maksimum sebesar 0.018 m, kecepatan maksimum 0.256 m/s, dan percepatan maksimum 6.001 m/s^2 . Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa pada $\gamma = 5$, respon penumpang kendaraan apabila dikenai beban

impact yang menggunakan sistem suspensi hidrolik lebih baik dari kendaraan dengan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* dikarenakan memiliki nilai perpindahan yang lebih kecil. Data nilai respon dinamis penumpang hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* terdapat pada tabel 5.17.

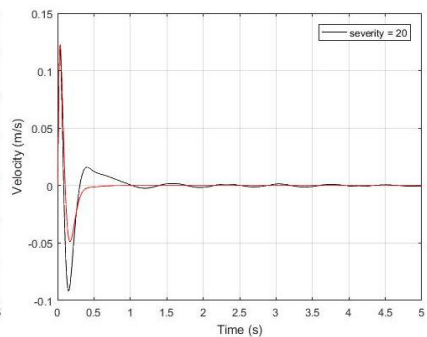
Tabel 5.17. Nilai respon dinamis penumpang hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* ($\gamma = 5$) menggunakan *input bump modified*

Jenis Suspensi	Perpindahan Maksimum (m)	Kecepatan Maksimum (m/s)	Percepatan Maksimum (m/s ²)	Settling Time (s)
Hidrolik	0,017	0,259	6,258	1,5
Modifikasi	0,018	0,256	6,001	1

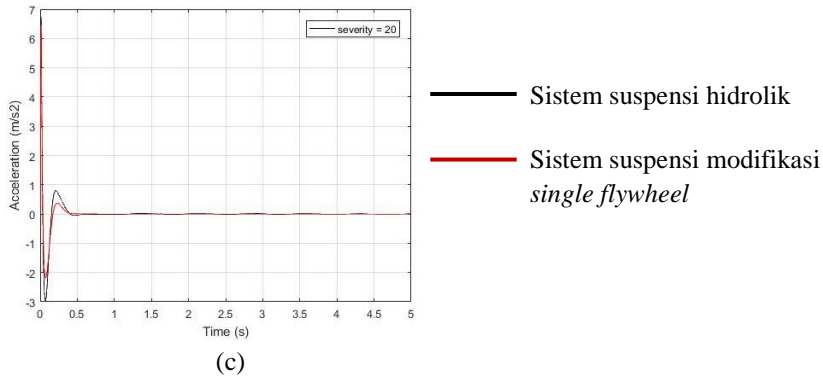
- **Severity Parameter = 20**



(a)



(b)



Gambar 5.16. Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan *input bump modified* ($\gamma = 20$)

Gambar 5.16 merupakan grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan penumpang terhadap waktu pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* menggunakan *input bump modified* ($\gamma = 20$). Dari ketiga grafik tersebut dapat diketahui bahwa respon dari grafik merupakan respon *transient*. Respon yang didapat dari kedua sistem suspensi tersebut mencapai kondisi *steady state* sebelum 1 detik.

Pada grafik hasil simulasi sistem suspensi hidrolik didapatkan nilai perpindahan maksimum sebesar 0.006 m, kecepatan maksimum 0.119 m/s, dan percepatan maksimum 6.74 m/s². Sedangkan pada sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*, didapatkan nilai perpindahan maksimum sebesar 0.007 m, kecepatan maksimum 0.123 m/s, dan percepatan maksimum 6.459 m/s². Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa pada $\gamma = 20$, respon penumpang kendaraan apabila dikenai beban *impact* yang menggunakan sistem suspensi hidrolik lebih baik dari kendaraan dengan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* dikarenakan memiliki nilai perpindahan yang lebih kecil.

Data nilai respon dinamis penumpang hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* terdapat pada tabel 5.18.

Tabel 5.18. Nilai respon dinamis penumpang hasil simulasi seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* ($\gamma = 20$) menggunakan *input bump modified*

Jenis Suspensi	Perpindahan Maksimum (m)	Kecepatan Maksimum (m/s)	Percepatan Maksimum (m/s ²)	Settling Time (s)
Hidrolik	0,006	0,119	6,74	1
Modifikasi	0,007	0,123	6,459	1

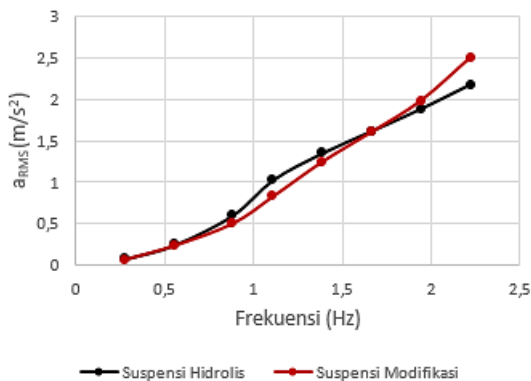
5.5. Perbandingan RMS (*Root Mean Square*) Percepatan Penumpang pada Sistem Suspensi Hidrolik dan Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan *Single Flywheel* dengan Variasi Kecepatan Kendaraan

Pada simulasi ini digunakan standar kenyamanan ISO 2631 untuk menganalisa kenyamanan penumpang kendaraan akibat eksitasi sinusoidal. Simulasi dilakukan dengan variasi kecepatan 10 km/jam hingga 80 km/jam dengan kenaikan setiap 10 km/jam. Dari kecepatan tersebut akan diperoleh nilai frekuensi dalam satuan Hz menggunakan persamaan $f = \frac{v}{\lambda}$, dengan mengasumsikan nilai λ (panjang jalan) sebesar 10 m. Setelah itu, nilai percepatan RMS yang telah disimulasikan akan diplot pada grafik kenyamanan ISO 2631. Pada grafik tersebut dapat diketahui lama ketahanan pengemudi saat berkendara menurut standar ISO 2631 untuk setiap frekuensi kendaraan. Nilai percepatan RMS dari setiap variasi frekuensi dapat dilihat pada tabel 5.19.

Tabel 5.19. Nilai percepatan RMS dari sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*

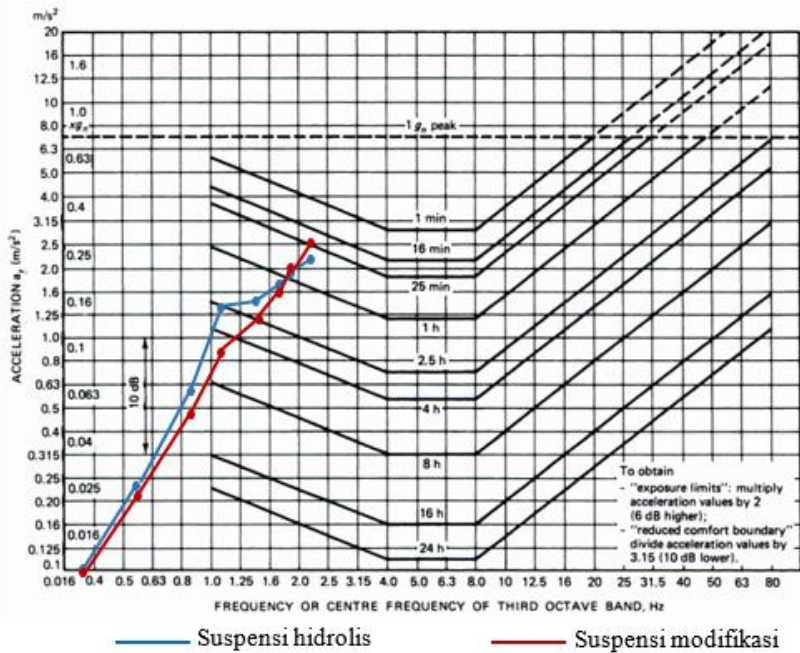
Kecepatan (km/jam)	Frekuensi (Hz)	Percepatan RMS (m/s^2)	
		Suspensi Hidrolik	Suspensi Modifikasi
10	0.278	0.0758	0.0621
20	0.556	0.2439	0.2306
30	0.833	0.6003	0.4972
40	1.111	1.0258	0.8255
50	1.389	1.348	1.2447
60	1.667	1.6141	1.6047
70	1.944	1.88	1.9834
80	2.222	2.1734	2.5042

Grafik perbandingan nilai percepatan RMS dari respon penumpang kendaraan yang menggunakan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* dapat dilihat pada gambar 5.17.



Gambar 5.17 Grafik respon percepatan RMS penumpang sistem seperempat kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi *single flywheel* terhadap frekuensi menggunakan *input* sinusoidal

Pada gambar 5.18 dapat diketahui hasil *plotting* percepatan RMS penumpang terhadap frekuensi kendaraan untuk mengetahui ketahanan berdasarkan standar ISO 2631.



Gambar 5.18 Grafik ketahanan pengemudi berdasarkan ISO 2631

Berdasarkan grafik ketahanan pengemudi, untuk kendaraan dengan sistem suspensi hidrolis dapat diketahui bahwa pada kecepatan 10 km/jam hingga 20 km/jam ketahanan pengemudi mencapai 24 jam, pada kecepatan 30 km/jam mencapai 8 jam, pada kecepatan 40 km/jam mencapai 2.5 jam, pada kecepatan 50 km/jam hingga 60 km/jam mencapai 1 jam, dan pada kecepatan 70 km/jam hingga 80 km/jam mencapai 25 menit. Sedangkan untuk kendaraan dengan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*, ketahanan pengemudi pada kecepatan 10 km/jam hingga 20 km/jam mencapai 24 jam, pada kecepatan 30

km/jam mencapai 8 jam, pada kecepatan 40 km/jam mencapai 4 jam, pada kecepatan 50 km/jam mencapai 2.5 jam, pada kecepatan 60 km/jam mencapai 1 jam, dan pada kecepatan 70 km/jam hingga 80 km/jam mencapai 25 menit. Pada kedua sistem suspensi tersebut, nilai ketahanan pengemudi saat berkendara memiliki nilai yang sama pada beberapa kecepatan, namun saat kecepatan 10 km/jam hingga 60 km/jam pada sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* menunjukkan *trend line* yang lebih rendah dibandingkan sistem suspensi hidrolik.

Dari analisis ketahanan pengemudi saat berkendara, dapat disimpulkan bahwa semakin bertambahnya kecepatan maka respon ketahanan pengemudi semakin menurun. Nilai respon ketahanan pengemudi dapat diketahui pada tabel 5.20.

Tabel 5.20. Perbandingan nilai ketahanan pengemudi saat berkendara dengan kendaraan yang menggunakan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*

Kecepatan (km/jam)	Ketahanan Berkendara	
	Suspensi Hidrolik	Suspensi Modifikasi
10	24 jam	24 jam
20	24 jam	24 jam
30	8 jam	8 jam
40	2.5 jam	4 jam
50	1 jam	2.5 jam
60	1 jam	1 jam
70	0.42 jam	0.42 jam
80	0.42 jam	0.42 jam

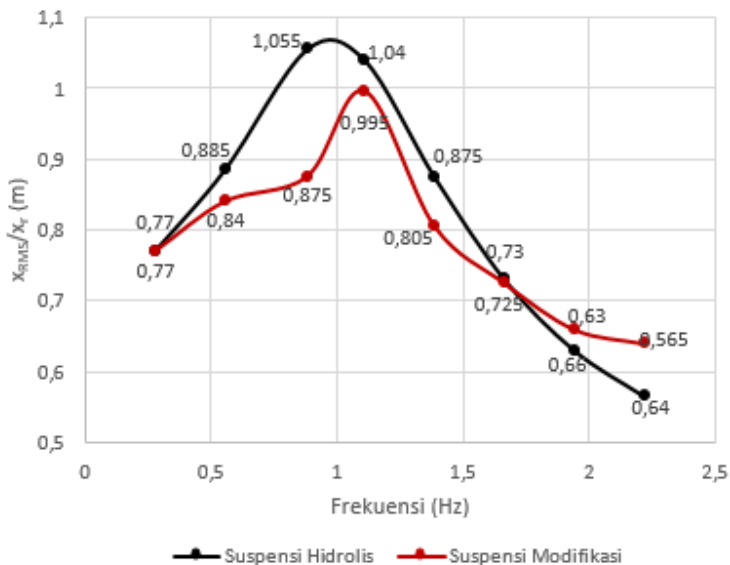
5.6. Perbandingan *Displacement Transmissibility Input Sinusoidal* pada Sistem Seperempat Kendaraan Menggunakan Sistem Suspensi Hidrolik dan Sistem Suspensi Modifikasi Penambahan *Single Flywheel*

Tabel 5.21 merupakan data perpindahan RMS hasil simulasi pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan penggunaan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*. Keduanya disimulasikan pada variasi kecepatan kendaraan 10 km/jam hingga 80 km/jam dengan kenaikan setiap 10 km/jam dan dengan mengasumsikan λ (panjang jalan) sebesar 10 m.

Tabel 5.21. Nilai perpindahan RMS dari sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*

Kecepatan (km/jam)	Frekuensi (Hz)	Perpindahan RMS (m/s ²)	
		Suspensi Hidrolik	Suspensi Modifikasi
10	0.278	0.77	0.77
20	0.556	0.885	0.84
30	0.833	1.055	0.875
40	1.111	1.04	0.995
50	1.389	0.875	0.805
60	1.667	0.73	0.725
70	1.944	0.63	0.66
80	2.222	0.565	0.64

Dari tabel 5.21 didapatkan grafik seperti pada gambar 5.19. Gambar tersebut merupakan grafik x_{RMS}/x_f terhadap variasi frekuensi dari kecepatan kendaraan, dimana x_{RMS} menunjukkan respon perpindahan RMS penumpang dan x_f menunjukkan amplitudo yang digunakan sebagai *input* profil jalan yaitu sebesar 0.02 m.



Gambar 5.19. Grafik perbandingan *displacement transmissibility* antara penggunaan sistem suspensi hidrolik dengan sistem suspensi modifikasi

Dari grafik *displacement transmissibility* tersebut dapat diketahui bahwa sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* memiliki karakteristik grafik yang sama, yaitu pada frekuensi 0.278 Hz mengalami peningkatan hingga pada frekuensi 1.111 Hz membentuk titik puncak, kemudian mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya frekuensi. Nilai x_{rms}/x_r dari titik puncak pada sistem suspensi hidrolik sekitar 1.06 Hz, sedangkan pada sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* sebesar 0.995 Hz.

Dari grafik pada gambar 5.19 dapat disimpulkan bahwa pada kecepatan 10 km/jam hingga 60 km/jam, kendaraan dengan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* lebih baik dibanding sistem suspensi hidrolik karena memiliki nilai x_{rms}/x_r yang lebih rendah. Sedangkan pada kecepatan di atas 60 km/jam,

kendaraan dengan sistem suspensi hidrolik lebih baik dibanding sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis pada sistem suspensi hidrolik, sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*, sistem seperempat kendaraan mobil dengan penggunaan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi penambahan *single flywheel*, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Karakteristik nilai gaya redam yang dihasilkan pada sistem suspensi *single flywheel* lebih tinggi dibandingkan dengan sistem suspensi hidrolik pada beberapa variasi frekuensi. Nilai gaya redam yang dihasilkan pada sistem suspensi hidrolik siklus kompresi lebih besar dibanding siklus ekspansi. Sedangkan pada sistem suspensi *single flywheel* dengan variasi densitas tidak didapatkan perbedaan nilai gaya redam yang signifikan dikarenakan kecilnya pengaruh densitas material terhadap nilai gaya redam yang dihasilkan;
2. Pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan penggunaan sistem suspensi hidrolik *input* sinusoidal, karakteristik respon kendaraan dan penumpang mencapai kondisi *steady state* kurang dari 3 detik dan 4 detik. Nilai *overshoot* maksimum sebesar 0.034 m dan 0.032 m pada respon perpindahan kendaraan dan penumpang saat $v = 40$ km/jam; pada respon kecepatan kendaraan dan penumpang, nilai *overshoot* maksimum sebesar 0.278 m/s dan 0.234 m/s saat $v = 80$ km/jam; pada respon percepatan kendaraan dan penumpang, nilai *overshoot* maksimum sebesar 4.316 m/s^2 dan 3.359 m/s^2 saat $v = 80$ km/jam. Sedangkan pada penggunaan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel input* sinusoidal, karakteristik respon kendaraan dan penumpang

mencapai kondisi *steady state* kurang dari 2 detik. Nilai *overshoot* maksimum sebesar 0.026 m saat $v = 80$ km/jam dan 0.023 m saat $v = 40$ km/jam pada respon kendaraan dan penumpang; pada respon kecepatan kendaraan dan penumpang, nilai *overshoot* maksimum sebesar 0.348 m/s dan 0.287 m/s saat $v = 80$ km/jam; pada respon percepatan kendaraan dan penumpang, nilai *overshoot* maksimum sebesar 5.026 m/s^2 dan 4.076 m/s^2 saat $v = 80$ km/jam;

3. Nilai percepatan RMS penumpang pada sistem suspensi hidrolik saat $v = 20$ km/jam sebesar 0.2439 m/s^2 ; saat $v = 40$ km/jam sebesar 1.0258 m/s^2 ; saat $v = 60$ km/jam sebesar 1.6141 m/s^2 ; dan saat $v = 80$ km/jam sebesar 2.1734 m/s^2 . Sedangkan pada sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel*, nilai percepatan RMS penumpang saat $v = 20$ km/jam sebesar 0.0621 m/s^2 ; saat $v = 40$ km/jam sebesar 0.2306 m/s^2 ; saat $v = 60$ km/jam sebesar 1.6047 m/s^2 ; dan saat $v = 80$ km/jam sebesar 2.5042 m/s^2 . Apabila dibandingkan dengan standar ISO 2631, pada penggunaan kedua sistem suspensi tersebut mulai kecepatan 60 km/jam dapat dikatakan tidak nyaman, sehingga kedua sistem suspensi tersebut kurang cocok digunakan pada kecepatan tinggi, tetapi nilai percepatan RMS penumpang dengan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* lebih rendah dibandingkan dengan sistem suspensi hidrolik.

6.2.Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, saran untuk pengembangan dalam penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Disarankan pada penelitian selanjutnya untuk mencoba menguji eksperimen sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single*

flywheel, serta sistem seperempat kendaraan mobil dengan penambahan sistem suspensi hidrolik dan sistem suspensi modifikasi penambahan *single flywheel* pada jenis variasi lain untuk mengetahui hasil yang maksimal dan lebih valid;

2. Disarankan pada penelitian selanjutnya untuk melakukan penelitian dengan mengganti susunan pada sistem suspensi modifikasi penambahan *flywheel* agar didapatkan hasil yang lebih efektif dalam mengurangi getaran;
3. Disarankan pada penelitian selanjutnya untuk meninjau sifat mekanik material yang sesuai pada *flywheel* agar didapatkan hasil yang efisien.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sutantra, Nyoman I. 2001. **Teknologi Otomotif Teori dan Aplikasinya**. Surabaya: Penerbit Guna Widya.
- [2] Alvarez-Sanchez, Ervin. 2013. *A Quarter-Car Suspension System: Car Body Mass Estimator and Sliding Mode Control*. Mexico: Universidad Veracruzana.
- [3] Poonamohan, Pinjarla, Kishore Lakshmana. 2012. *Design and Analysis of a Shock Absorber*. India: GIET.
- [4] Hestingrum, Yunita dan Laksana Guntur, Harus. 2015. **Pemodelan dan Analisis Pengaruh Perubahan Parameter Sistem Suspensi Oleo-Pneumatic terhadap Gaya Redam dan Gaya Pegas serta Respon Dinamis Penumpang Pesawat Boeing 747-400 Proses Landing dan Takeoff**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- [5] Rao, Singiresu S. 2011. *Mechanical Vibrations Fifth Edition*. Miami: Pearson Education, Inc.
- [6] C. Smith, Malcolm, dkk. *Synthesis of Mechanical Networks: The Inerter*. Cambridge: University of Cambridge.
- [7] Ayu Rachmawati, Tri dan Laksana Guntur, Harus. 2015. **Pemodelan dan Analisa Respon Dinamis dan Energi Bangkitan dari Hydro-Magneto Electric Regenerative Shock Absorber pada Sistem Suspensi Truk dengan Kapasitas Engine 4000 cc**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- [8] Santosa, Dikki Tesna, Sumardi, dan Triwiyatno, Aris. 2012. **Perancangan Sistem Suspensi Aktif Nonlinear Tipe Paralel dengan Kendali Hybrid Fuzzy PID pada Model Seperempat Kendaraan**. Semarang: Universitas Dipenogoro.
- [9] Wikipedia. 2015. *Flywheel*, <URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Flywheel>>

BIODATA PENULIS



Bella Kartika Ferani dilahirkan di Surabaya, 11 September 1994, putri sulung dari pasangan Karto dan Suli Suliam. Riwayat pendidikan penulis diawali di TK Bina Utama 2 Surabaya pada tahun 1998 – 2000. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan di SDN Tembok Dukuh IV Surabaya pada tahun 2000 – 2002, SDN Ngampelsari Sidoarjo tahun 2002 – 2006, kemudian melanjutkan di SMPN 1 Sidoarjo pada tahun 2006 – 2009, kemudian melanjutkan di SMAN 1 Sidoarjo pada tahun 2009 – 2012. Selanjutnya penulis melanjutkan jenjang S-1 Jurusan Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun organisasi selama perkuliahan. Penulis juga pernah menjadi asisten Laboratorium Otomotif serta Laboratorium Vibrasi dan Sistem Dinamis. Dalam organisasi kemahasiswaan, penulis aktif menjadi Sekretaris Badan Semi Otonom Himpunan Mahasiswa Mesin periode 2014 – 2015.

Motto hidup penulis yaitu “hidup adalah seni mengolah keterpaksaan” menjadikan penulis selalu termotivasi, yakin, dan berpikiran positif dalam menjalani setiap kegiatan. Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email bellakartikaferani@gmail.com